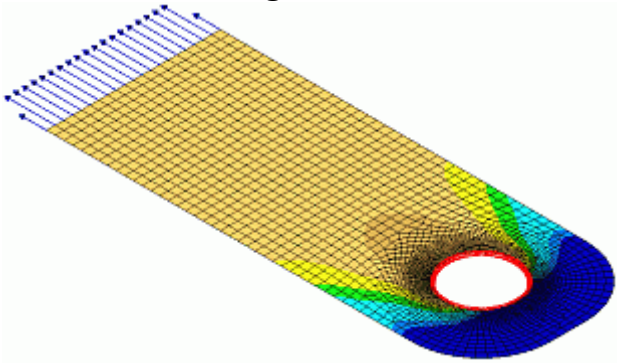
Software: FEM - Tutorial - FEM-Prozess

Aus OptiYummy
↑

← →

1. Komplex im FEM-Tutorial
FEM-Prozess (Beispiel 2D-Mechanik)
Autor: Dr.-Ing. Alfred Kamusella



Die Leute, die niemals Zeit haben, tun am wenigsten.
- *Georg Christoph Lichtenberg* -

A. Einleitung

- Beispiel
- Maßsystem

B. CAD-Modell basierter Prozess

1. Preprocessing (Modellbildung)

- Geometrie (CAD-Modell)

  1. Projekt-Definition
  2. Bauteil-Definition
  3. Grundkörper (Skizziertes Element)
  4. Bohrung (Platziertes Element)
  5. Abrundung (Platziertes Element)

- Definition physikalischer Eigenschaften (Material)
- CAD-Modell in FEM-Tool übertragen
- Netzgenerierung
- Hinzufügen der Lasten (Loads)
- Randbedingungen definieren (Constraints)

2. Modellberechnung

- Analyse (Simulation)

3. Postprocessing (Ergebnisse)

- Auflage-Reaktionen
- Vergleichsspannung
- Deformation
- Beanspruchung (Sicherheitsfaktor)

4. Modifizierte Randbedingungen

- Spielpassung auf biegesteifem Bolzen

5. Zusammenfassende Vertiefung (Videos)

- *Navigation in der Benutzeroberfläche*
- *Multifunktionsleiste und Arbeitsablauf*
- *Netzerstellung von CAD-Modellen*
- *Lagerbelastungen und Stiftabhängigkeiten*

C. Manuelle Netzerzeugung ohne CAD-Modell

- Geometrie-Modellierung im FEM-Editor
- Definition physikalischer Eigenschaften (Material)
- 2D-Netzgenerator
- Lasten und Randbedingungen
- Strukturierte Vernetzung (mit Modell-Symmetrie)

Einzusendende Ergebnisse

- Teilnehmer der Lehrveranstaltung **"Finite Elemente Methode"** schicken ihre Ergebnisse per Mail an **a.kamusella@ifte.de**
- Die in der Übungsanleitung gestellten **4 Fragen** sind im Text der Mail zu beantworten.
- Als Anhang dieser Mail mit (xx=Teilnehmer-Nummer 01...99) ist ein Archiv-File (**Mechanik2D_xx.ZIP**) mit folgendem Inhalt zu senden:

    1. Die CAD-Datei **Lasche_xx.ipt**
    2. Simulationsmodelle (***.fem**) **Lasche_xx** und **2D-Lasche_xx** und zugehörige Ordner (***.ds_data**).

Hinweise:

- Das Archiv-File besitzt eine Größe von >250 MByte. Da ein Senden per Mail dadurch unmöglich ist, muss diese Archiv-Datei z.B. über einen Link zur privaten DropBox oder zum privaten TUD-Webspace zum Laden bereitgestellt werden.
- Die Dateien dieser Übung umfassen mehr als 1 GByte. Teilnehmer der Lehrveranstaltung **"Finite Elemente Methode"** sichern den aktuellen Bearbeitungszustand auf privaten Datenträgern.
- Auf dem Home-Verzeichnis der benutzten Windows-Domäne (PC-Pool) sind jeweils nur die Dateien der aktuellen FEM-Übung als Arbeitsversion zu speichern!

Einsendeschluss:

- Die Nacht vor dem nächsten Übungskomplex. Die Nacht endet morgens um 10:00 Uhr.

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_FEM-Prozess&oldid=16362“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Beispiel

Aus OptiYummy
↑

← →

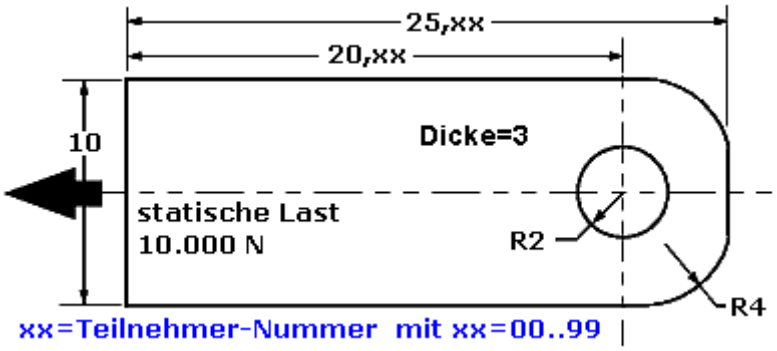
Beispiel

Am Beispiel der statischen Zugbelastung eines Blechstreifens soll in einem FEM-System der gesamte FEM-Prozess komplett durchgespielt werden:

- Wer bereits in einem CAD-Systems Belastungsanalysen (**CAD-Tutorial**) durchgeführt hat, wird erstaunt sein, wie umständlich und aufwändig die gleiche Analyse in einem FEM-System sein kann.
- Die umfangreiche Funktionalität eines FEM-Systems kann auf Grund ihrer Andersartigkeit den erfahrenen CAD-Nutzer zumindest erst einmal verwirren.
- Für den Einsteiger in die FEM ist es wichtig, zuerst ein Gefühl dafür zu entwickeln:
  1. wie man mit den erforderlichen Finite-Elemente-Netzen arbeitet
  2. welche grundlegenden Fehler man dabei machen kann

Problem-Beschreibung

- Die Lasche mit einer **Dicke=3 mm** soll als Aufhängung für eine größere statische Last dienen:



- Wir werden die Geometrie und die Eigenschaften des Materials definieren.
- Wir erstellen ein Finite-Elemente-Netz und definieren die Zwangsbedingungen und die Belastung.
- Die Halterung (Lasche) soll aus **Stahl C35** gefertigt werden.
- Für die Befestigung werden wir unterschiedliche Varianten untersuchen:
  1. Der Rand des Loch wird vollständig fixiert (Verschweißt mit einem ideal starren Bolzen). Das Loch bildet also mit dem ideal starren Bolzen ein Festlager.
  2. Vergleichend dazu untersuchen wir die Lagerung der Lasche mittels Spielpassung auf dem ideal starren Bolzen.
  3. Wir versuchen dann abschließend, die Nachgiebigkeit des Bolzens für den Fall des verschweißten Lochrandes nachzubilden.
- Die Lasche wird zuerst belastet mit einer statischen Zugkraft von 10.000 N. Danach werden wir die zulässige Zugkraft für einen Sicherheitsfaktor=2 ermitteln.

Modellbildungsprozess

- Die Erstellung eines Finite-Elemente-Modells verläuft grundsätzlich in drei Schritten:
  1. Erstellen der Geometrie
  2. Definition physikalischer Eigenschaften und Vernetzung
  3. Definieren von Randbedingungen / Belastungen

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Beispiel&oldid=16367“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Mass-System

Aus OptiYummy
↑

← →

Wahl des Maßsystems

Hinweis:

Klassische FEM-Systeme verwenden auf ihrer Benutzeroberfläche häufig noch keine Maßeinheiten, sondern rechnen nur mit den Zahlenwerten. Der Nutzer ist für die Interpretation dieser Zahlenwerte als physikalische Größe selbst verantwortlich! Erst die neueren Entwicklungen unterstützen den Anwender bei der Verwendung von Maßeinheiten, einschließlich ihrer Umrechnung.

- Wenn wir unser Blechteil in einem CAD-System bearbeiten, so ist es dort üblich, an der Schnittstelle zum Nutzer in Millimeter [mm] zu hantieren. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, andere Maßeinheiten zu wählen. Das rechnerinterne CAD-Modell benutzt jedoch zumindest in der deutschsprachigen Version meist die SI-Basiseinheit Meter [m].
- Wir werden in den FEM-Übungen nach Möglichkeit grundsätzlich mit der Einheit Meter [m] arbeiten und auch konsequent alle anderen physikalischen Größen mit SI-Einheiten (ohne "Vorsätze") verwenden. Nur so vermeidet man die Fehlerquelle der Umrechnungsfaktoren.
- Die Konsequenzen sollen für die Mechanik-Domäne an gebräuchlichen Maßsystemen verdeutlicht werden:

System	Länge	Masse	Zeit	Kraft
MKS (SI)	1 m	1 kg	1 s	1 N
c g s	1 cm	1 g	1 s	0.00001 N
TMS (alt)	1 m	1 TM=1 kp*s²/m	1 s	1 kp=9,81 N
fps	1 ft	1 lb	1 s	1 lbf=4,45 N

MKS (SI) = Meter Kilogramm Sekunde
c g s = Zentimeter Gramm Sekunde (absolutes System, Gauß)
TMS (alt)= Technisches Maßsystem
fps = feet pound second (lb=pound)

- Wenn man von den SI-Einheiten abweicht, besitzen die Werte der berechneten physikalischen Größen mehr oder weniger "exotische" Dimensionen. Besonders kritisch ist dabei, dass man dies auch bei der Eingabe der Materialwerte berücksichtigen muss, die sich ja ebenfalls in das gewählte Maßsystem einordnen!

Achtung:

Die beschränkte Genauigkeit des Gleichungslösers kann bei sehr unterschiedlichen Größenordnungen der verwendeten physikalischen Größen zu nicht vernachlässigbaren Fehlern führen, z.B. in Mikrosystemen:

10^{-15} kg, 10^{-6} m und 10^{+3} V

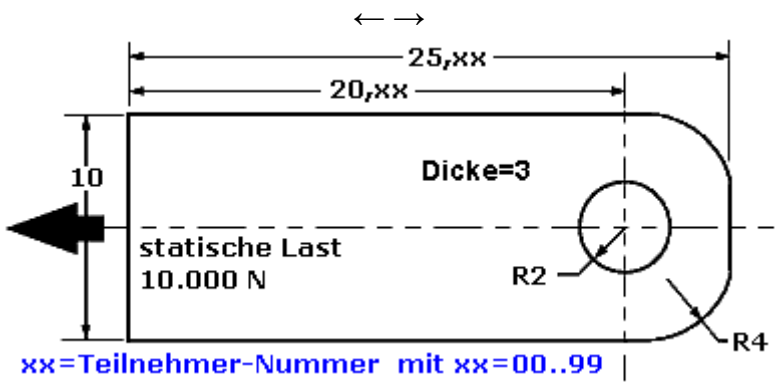
In solchen Fällen muss man auf ein geeignetes Maßsystem umsteigen (z.B. auf der Basis von µm für die Länge) und die Umrechnungsfaktoren konsequent für alle physikalischen Größen beachten.

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Mass-System&oldid=16368“

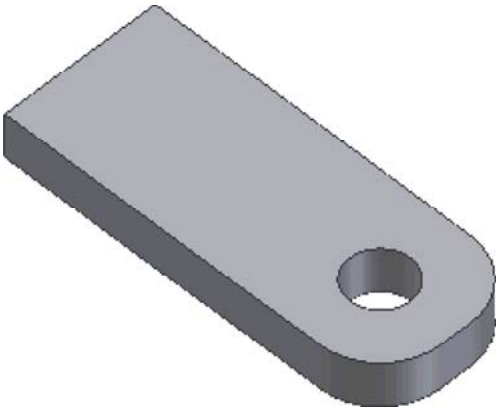
Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Geometrie

Aus OptiYummy
↑



Geometrie (CAD-Modell)

Die Abfolge der Prozess-Schritte beginnt mit der Geometrie-Modellierung:



Das zu untersuchende Bauteil kann innerhalb eines CAD-Systems als CAD-Modell meist bedeutend leichter modelliert werden, als in einem FEM-Programm:

- Damit das FEM-Tutorial unabhängig von einer vorherigen Einarbeitung in *Autodesk Inventor* benutzbar ist, wird auf den folgenden Seiten die Modellierung der Geometrie für den CAD-Laien ausführlich beschrieben.
- Zur Software-Beschaffung, Installation und Inbetriebnahme wird dem "Inventor-Laien" der Abschnitt **Einführung in Autodesk-Inventor** empfohlen.

Wichtig:
Wer bereits im Rahmen des CAD-Tutorials die Belastungsanalyse an obiger Lasche innerhalb des *Autodesk Inventor* durchgeführt hat, sollte die Lasche unbedingt neu konstruieren. Ansonsten werden die im CAD-Modell vorhandenen Vernetzungsinformationen in das FEM-Modell übernommen. Damit könnte man den im nachfolgenden beschriebenen FEM-Prozess nicht in allen Details nachvollziehen.

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Geometrie&oldid=16186“

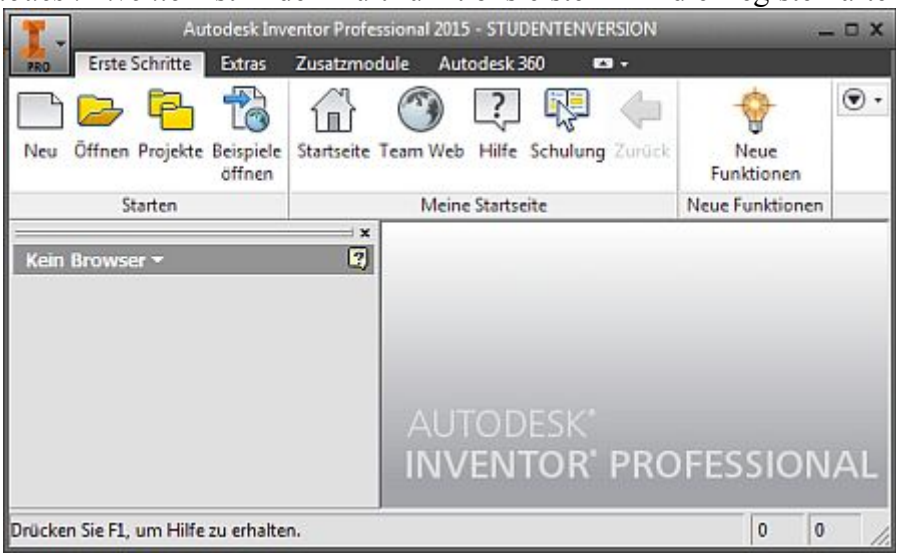
Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Projekt-Definition

Aus OptiYummy
↑

← →

Projekt-Definition

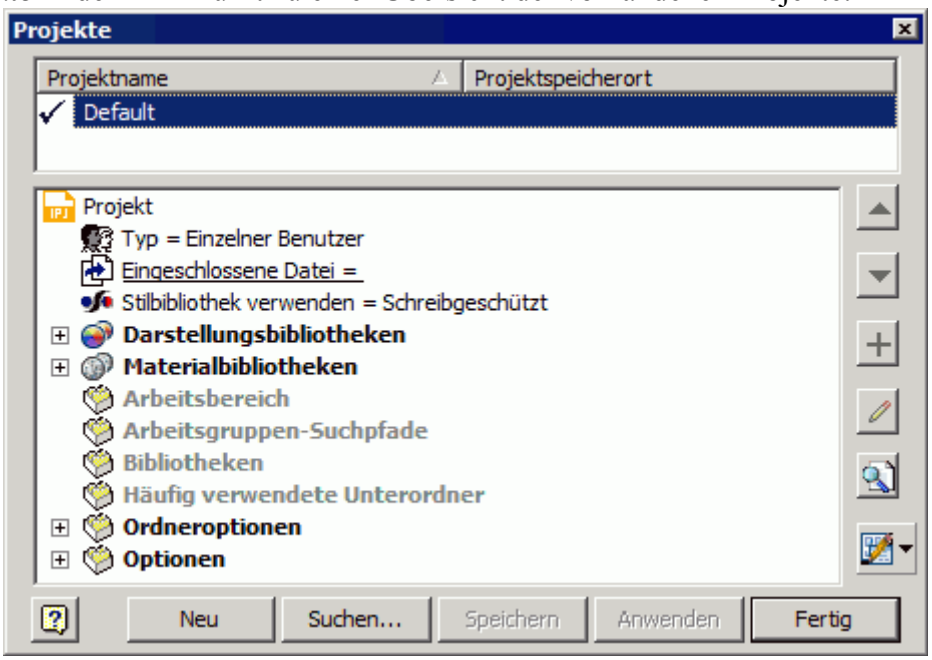
Nach dem Start von *Autodesk Inventor* ist in der Multifunktionsleiste ***MFL*** die Registerkarte *Erste Schritte* aktiv:



Jegliche Arbeit in einem CAD-System erfolgt im Rahmen eines Projektes:

1. Unter dem jeweiligen Projektnamen verwaltet das CAD-System die Konfiguration der Arbeitsumgebung und aller benutzten Dateien.
2. Man kann damit den aktuellen Bearbeitungszustand eines Entwurfsprozesses verlustfrei auf unterschiedliche Computer transportieren.

Der Aufruf von ***Projekte*** in der ***MFL*** führt zu einer Übersicht der vorhandenen Projekte:

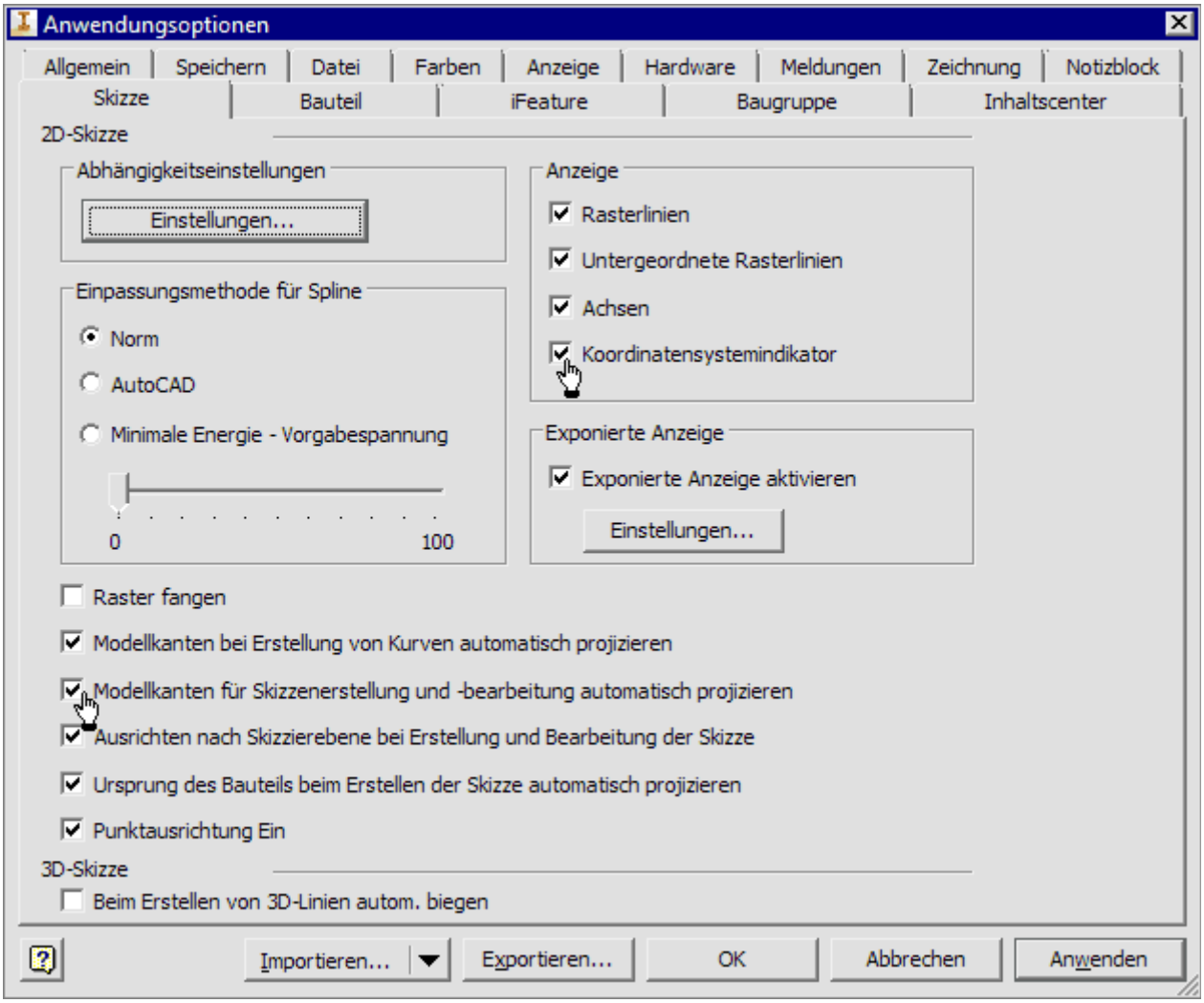


- Inventor-Einsteiger sollten in dieser Übung darauf achten, dass *Default* als Projektname ausgewählt und aktiv ist. Das damit definierte Standard-Projekt verwaltet die CAD-Dateien im Ordner "Eigene Dokumente".
- Erfahrene CAD-Nutzer sollten ein neues Einzelbenutzer-Projekt "2D-Mechanik_xx" definieren (**xx**=Teilnehmer-Nr. 00...99).

Hinweis:
Damit in den folgenden Bearbeitungsschritten in den Skizzen ein Koordinatensystem angezeigt wird, muss man dies über ***Anwendungsoptionen*** aktivieren.

> Optionen > Skizze führt zur gewünschten Registerkarte:

- Darin aktiviert man die **Anzeige - Koordinatensystemindikator** und achtet darauf, dass die **Rasterlinien-Anzeige** ebenfalls aktiviert ist:



- Die Option "**Modellkanten für Skizzenerstellung und -bearbeitung automatisch projizieren**" ist in neueren Inventor-Versionen nicht mehr automatisch aktiv, sollte aber im Rahmen dieser Übung aus Komfortgründen aktiviert werden!

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Projekt-Definition&oldid=16194“

-

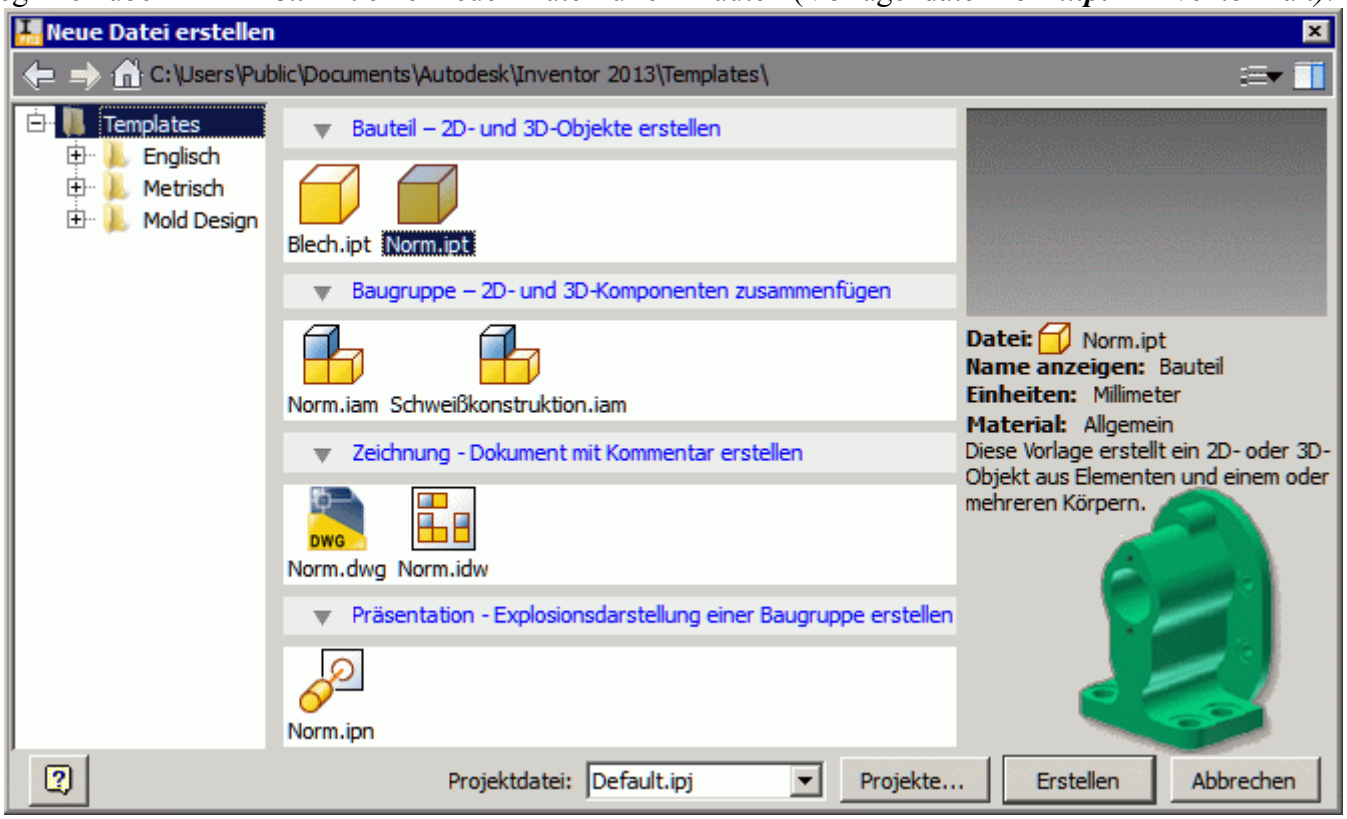
Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Bauteil-Definition

Aus OptiYummy
↑

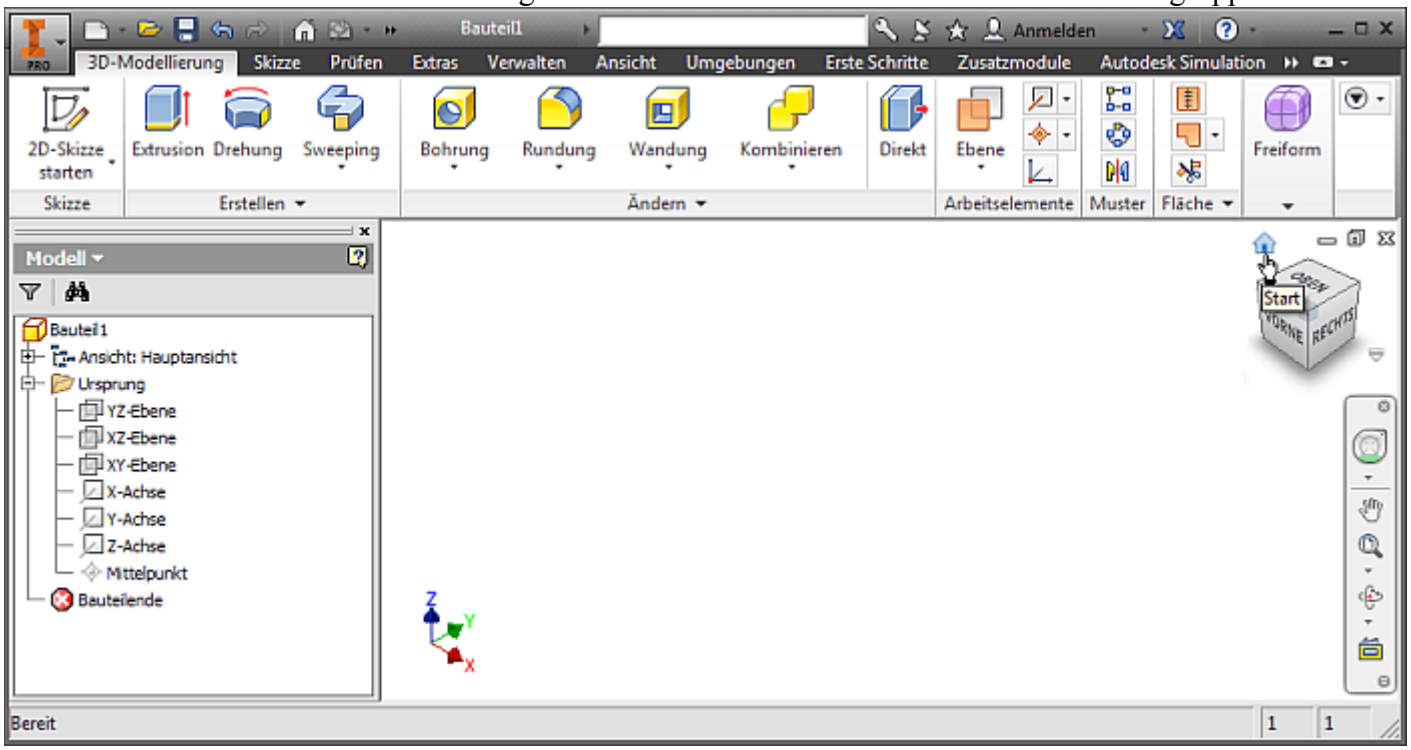
← →

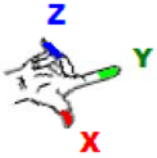
Bauteil-Definition

Wir beginnen über ***MFL-Neu*** mit einer neuen Datei für ein Bauteil (Vorlagendatei ***Norm.ipt*** = ***I***nventor ***P***art***)***:



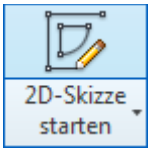
Nach Auswahl der Bauteil-Vorlage *Norm.ipt* gelangt man in die Modell-Umgebung für Bauteile und befindet sich darin im 3D-Modus für die 3D-Modellierung. Die ***MFL*** ist nun mit einer Vielzahl von Befehlsgruppen versehen:



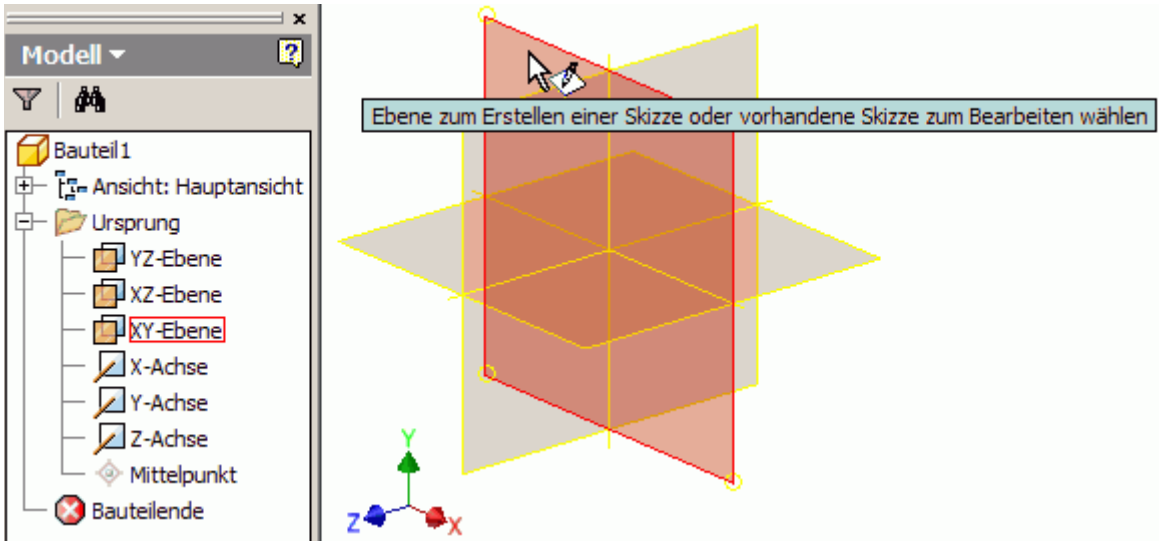


- Es existiert in der CAD-Datei ein Bauteil-Koordinaten-System "Ursprung" mit dem Mittelpunkt (0,0,0). Die Details des Ursprung-Koordinatensystems werden im Modell-Browser erst sichtbar, wenn wir den zugehörigen Ordner öffnen (Klick auf + vor Ordnersymbol *Ursprung*).
- Die Wahl der isometrischen **Start**-Ansicht am **Viewcube** zeigt eine Orientierung des Koordinatensystems, welche unseren Anschauungen entspricht (Z-Achse=Höhe über XY-Grundfläche).
- Man kann sich über die "Rechte-Hand-Regel" die Farbzuordnung merken. XYZ=**RGB** (Farbraum **R**ot/**G**rün/**B**lau)

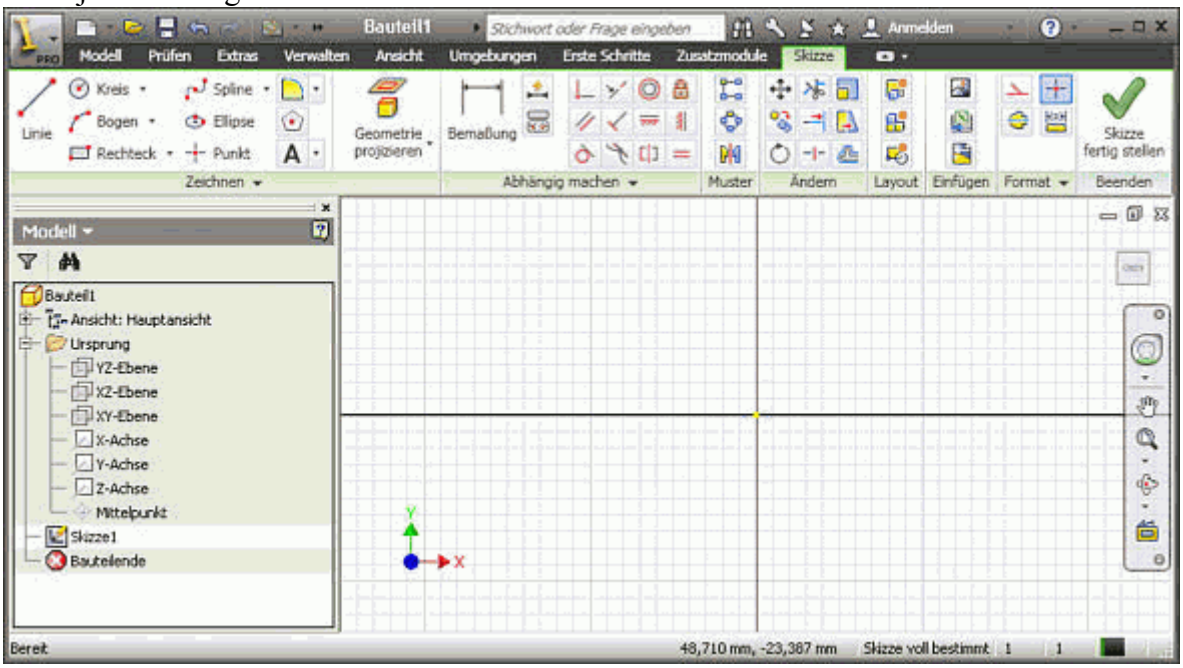
Bauteile werden Element für Element auf der Basis von Skizzen entwickelt. Die 3D-Elemente entstehen aus 2D-Skizzen (=Form der Elemente) durch 3D-Operationen (z.B. Extrusion, Rotation, Sweeping).



Wir erstellen die Basis-Skizze für das Rohteil auf die XY-Ebene des Bauteil-Koordinatensystems:



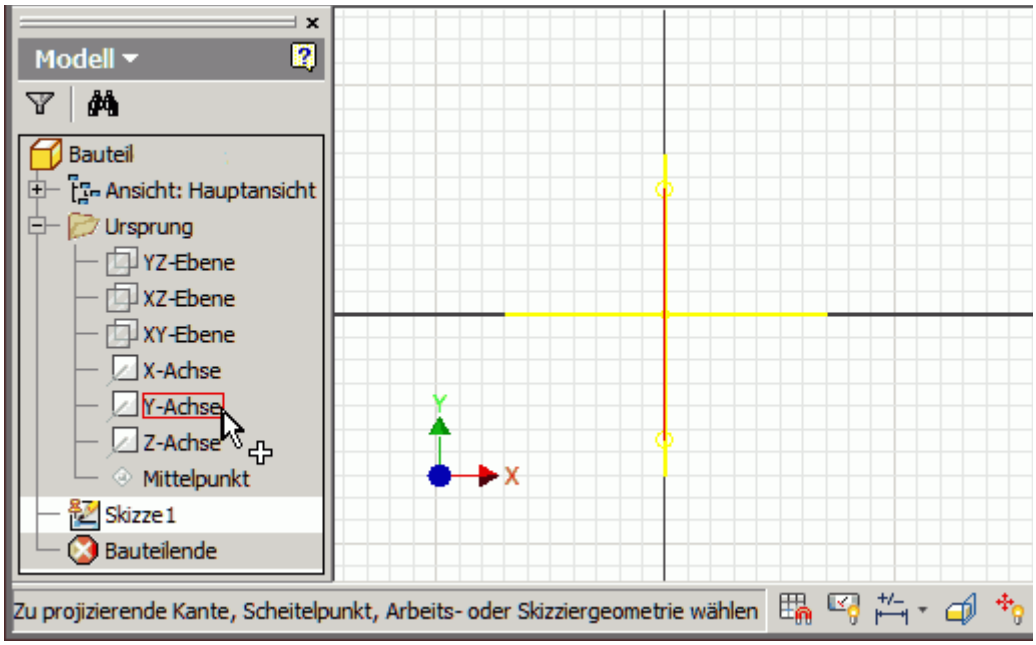
- Die Ansicht wird danach an der Skizzier-Ebene ausgerichtet und man befindet sich im Skizzen-Modus.
- In der MFL ist jetzt die Registerkarte **Skizze** mit den Funktionen für die 2D-Geometrie aktiv:



Es ist zwar nicht zwingend erforderlich, aber man sollte Bauteile grundsätzlich fest am Ursprung-Koordinatensystem "verankern"! Mittels des Befehls ***Geometrie projizieren*** werden dafür die benötigten Achsen bzw. der Mittelpunkt in die Basis-Skizze projiziert. Nur auf projizierte Elemente

des Koordinatensystems kann man in der Skizze Bezug nehmen. Den Mittelpunkt und eine Koordinatenachse des Ursprungs benötigt man in jedem Fall, damit man die Basisskizze (=Skizze1) verdreh- und verschiebungssicher am Bauteil-Koordinatensystem verankern kann.

Man sollte sich angewöhnen, grundsätzlich Mittelpunkt, X- und Y-Achse in die Basisskizze zu projizieren! Nach Aktivieren von *Geometrie projizieren* muss man diese Elemente im Modell-Browser anklicken. Es erscheinen dann der Punkt und zwei Strecken als unscheinbare Elemente in der Skizze:



Hinweis:

Befehle beendet man mittels **ESC**-Taste oder durch Aufruf des nächsten Befehls.

Achtung:

Wir speichern das Bauteil als **Lasche_xx.ipt** (mit **xx**=Teilnehmer-Nr. 00...99). Dazu muss man zuvor über die ***MFL*** die ***Skizze fertig stellen***.

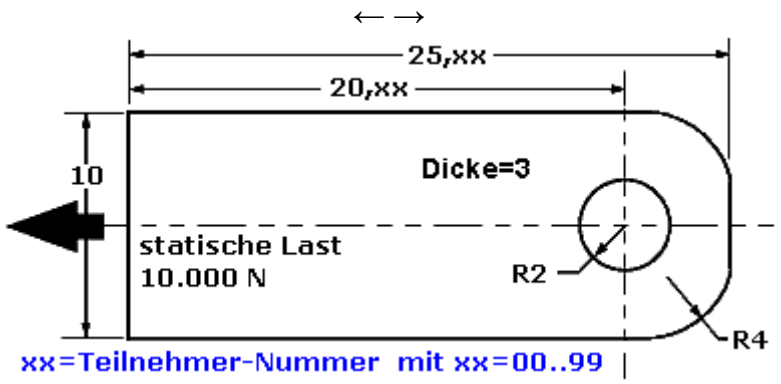
← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Bauteil-Definition&oldid=16184“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Bauteil-Grundkoerper

Aus OptiYummy
↑



Bauteil-Grundkörper (Skizziertes Element)

CAD-Modelle (Bauteile):

sollten grundsätzlich fertigungsorientiert entwickelt werden. Man muss also zuerst klären, mit welchem Fertigungsverfahren soll das Teil hergestellt werden!
Handelt es sich um ein abtragendes Verfahren, so beginnt man mit dem Rohteil (Grundkörper). Dieses muss in der Größe den Hauptabmessungen des Bauteils entsprechen. Das Bauteil entsteht schrittweise durch die Definition von Elementen (im Beispiel zur schrittweisen Materialabtragung vom Grundkörper).

Basiselement:

ist das erste Element, das in einem Bauteil erstellt wird. Das Basiselement sollte die Ausgangsform (Rohteil) des Bauteils darstellen.

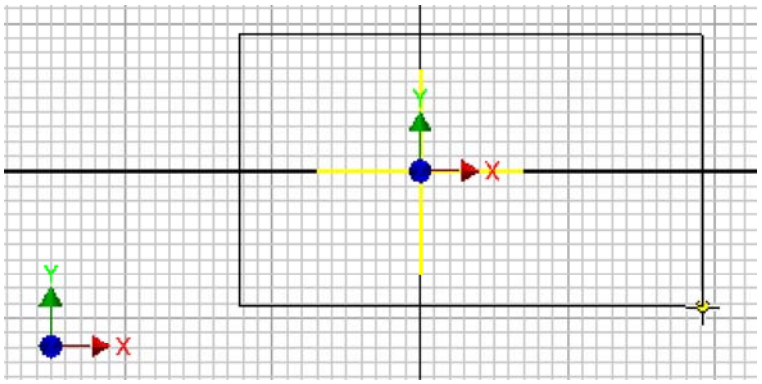
Elemente:

sind abgegrenzte Einheiten parametrischer Geometrie, aus denen die komplexere Geometrie von Bauteilen schrittweise entwickelt wird.

Skizziertes Element:

entsteht als Volumen-Element aus einer 2D-Skizze durch Anwendung geometrischer Operationen (z.B. Extrusion, Rotation).
Das durch ein skizziertes Element erstellte Volumen kann mit dem Volumen vorhandener Elements verbunden oder von diesen subtrahiert werden. Außerdem kann die gemeinsame Schnittmenge bestimmt werden.

Die Lasche soll im Beispiel aus einer rechteckigen Platte gefertigt werden. Wir benötigen als Basiselement (=Rohteil) einen flachen Quader mit den Abmessungen **25,xx·10·3 mm³**. Dieser soll als skizziertes Element entwickelt werden, deshalb öffnen wir die Basis-Skizze (Doppelklick auf Symbol in Baumstruktur). Wir skizzieren ein Rechteck (durch zwei Punkte) **ohne** dabei auf die Größe zu achten:



- Das Rechteck sollte irgendwie das Koordinatensystem umschließen, damit man es danach günstig am Koordinatensystem verankern kann.
- Beim Skizzieren des Rechtecks sollte man darauf achten, dass keine unerwünschten Beziehungen zur vorhandenen Skizzier-Geometrie der projizierten Koordinatenachsen hergestellt werden. Diese Automatismen erkennt man, indem entsprechende Symbole am Cursor eingeblendet werden.

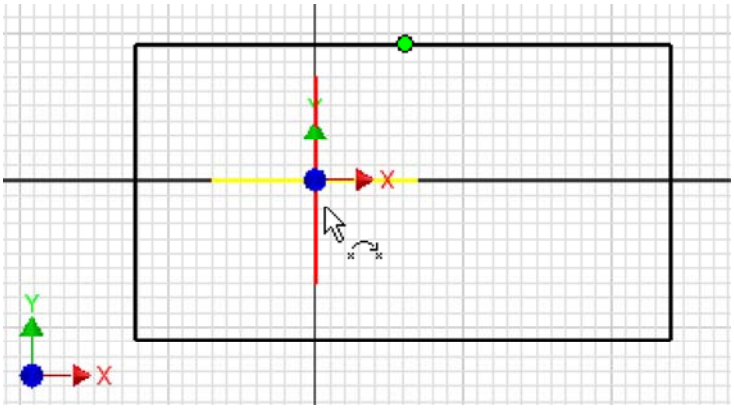
Das Basiselement wird so am Koordinatenursprung verankert, dass die Koordinatenachsen als Symmetrieachsen des Grundkörpers (Rohteil) verwendet werden können. Im Beispiel soll der Mittelpunkt des Koordinaten-Ursprungs im Schwerpunkt des Rechtecks liegen:

- Dazu muss man Abhängigkeiten zwischen den Skizzen-Elementen des Basiselements und den Koordinatenachsen bzw. dem Ursprung-Mittelpunkt festlegen.
- Im Beispiel kann man die Mittelpunkte zweier orthogonaler Rechteckseiten koinzident mit der X-Achse bzw. der Y-Achse verknüpfen.

Abhängigkeit Koinzident bedeutet hier:

- ***Zwei Punkte*** (auch Punkte von Kurven) - sie liegen immer übereinander.
- ***Punkt und Linie*** - der Punkt liegt immer auf der Linie oder ihrer unsichtbaren Verlängerung.

Dafür nutzt man z.B. in der ***MFL*** die Funktion ***Abhängigkeit erstellen*** > ***Koinzident*** und wendet diese jeweils auf einen Seiten-Mittelpunkt und die zugehörige Koordinaten-Achse an:



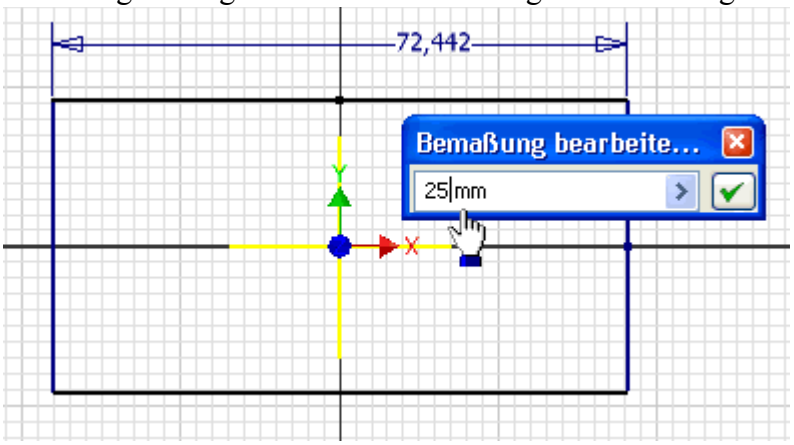
Achtung:

2D-Elemente in Skizzen sind unbestimmt groß, solange ihre Größe nicht durch Bemaßung oder zusätzliche Abhängigkeiten festgelegt wird. Praktisch bedeutet dies, dass man z.B. mit dem Maus-Cursor die Größe durch Ziehen noch beliebig ändern kann (Probieren an den Eckpunkten - die symmetrische Verankerung am Koordinatensystem muss erhalten bleiben!).

Wir legen die Größe des Rechtecks von **25,xx·10 mm²** durch ***MFL > Skizze > Bemaßung*** der Rechteck-Seiten fest:

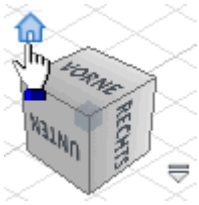
- Anklicken einer Rechteckseite und ziehen der Bemaßung auf die gewünschte Position.

- Klick auf die Maßzahl und Eintragen der gewünschten Kantenlänge in das Dialogfeld.

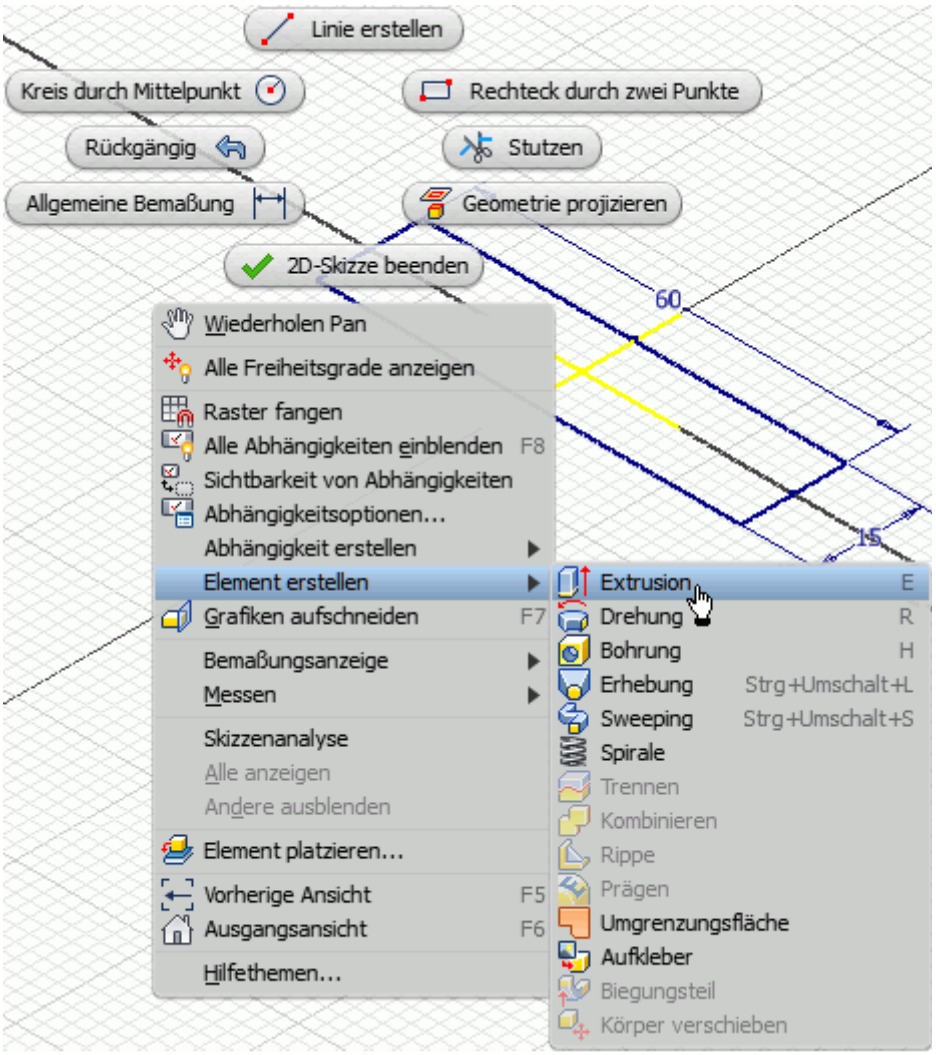


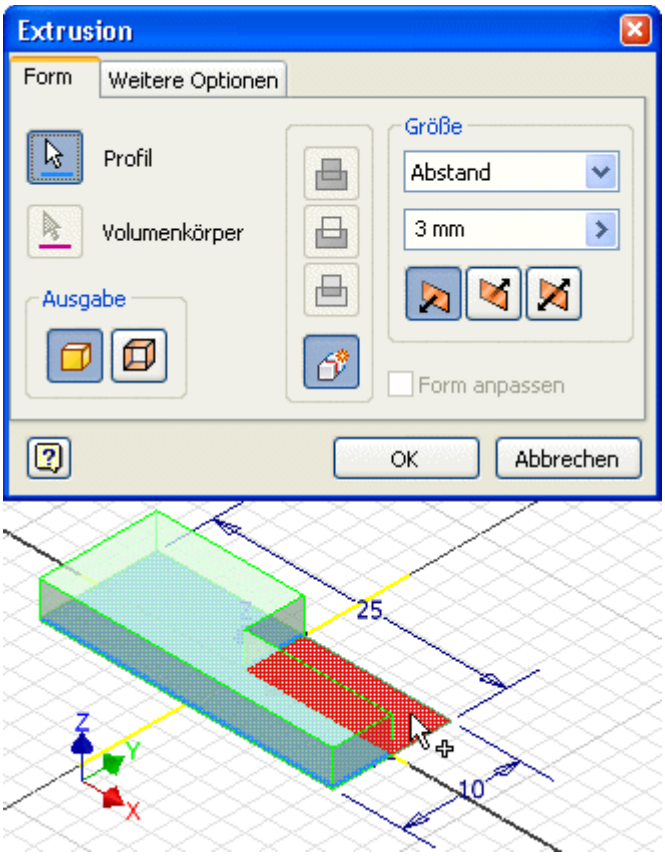
Über diese Modellbemaßung kann die aktuelle Größe des Grundkörpers auch später noch beeinflusst werden (nach Doppelklick auf die Maßzahl).

In einem abschließenden Schritt erzeugen wir nun aus der Rechteck-Skizze den Grundkörper durch Extrusion:



- Zuvor Bemaßung mit **ESC** beenden!
- Zur besseren Sichtbarkeit dieser Element-Erzeugung wechseln wir in die ***Ausgangsansicht*** (Isometrieansicht). Am günstigsten ist hierfür die Nutzung des ***ViewCube*** (Start-Ansicht).
- Dann können wir das ***Element erstellen*** (Kontextmenü rechte Maus) mittels ***Extrusion*** des Rechteck-Profils:





- Bei der Wahl des Rechteck-Profils kann es durch die projizierten Koordinaten-Achsen erforderlich sein, das Profil durch Auswahl mehrerer Teilflächen zusammenzusetzen, bevor man mit **OK** quittiert.

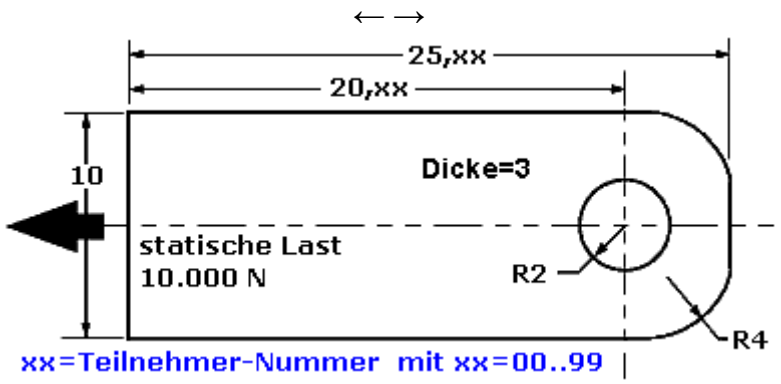
← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Bauteil-Grundkoerper&oldid=16371“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Bauteil-Bohrung

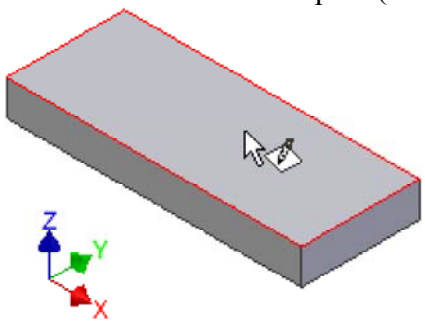
Aus OptiYummy
↑



Bauteil-Bohrung (Platziertes Element)

Bei der fertigungsorientierten CAD-Modellierung entsteht das fertige Bauteil in Analogie zur geplanten Fertigung schrittweise durch das Erzeugen weiterer Elemente aus dem Grundkörper. Wir beginnen mit der durchgängigen Bohrung, welche einen Durchmesser von 4 mm besitzen soll.

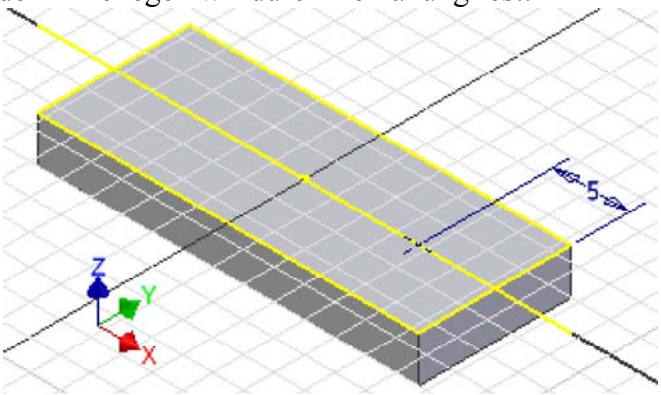
- Wir "legen" eine neue Skizze auf der Deckfläche des Grundkörpers (***MFL > 2D-Skizze erstellen***):



Die Position der Bohrung legen wir in der Skizze durch die Definition eines Mittelpunkts fest:

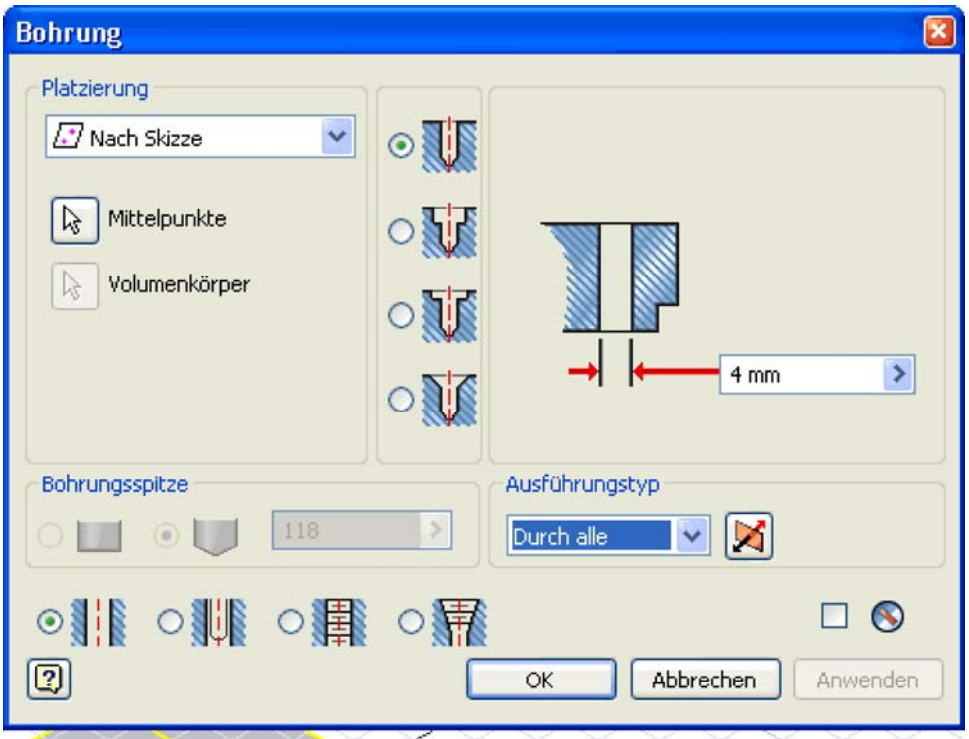
- Der Inventor ist standardmäßig so konfiguriert, dass die Konturen der Fläche, auf welche eine Skizze platziert wird, automatisch in diese Skizze projiziert werden.
- Auf die Konturen dieser Fläche kann nun mit den neuen Skizzen-Elementen Bezug genommen werden.
- Der Mittelpunkt muss direkt auf der längeren Symmetrie-Achse der Rechteck-Fläche mittels Koinzidenz-Abhängigkeit verankert werden. Die dafür benötigte Symmetrie-Linie muss zuvor mittels ***Geometrie projizieren*** aus der X-Achse des Ursprung-Koordinatensystems gewonnen werden!
- Den

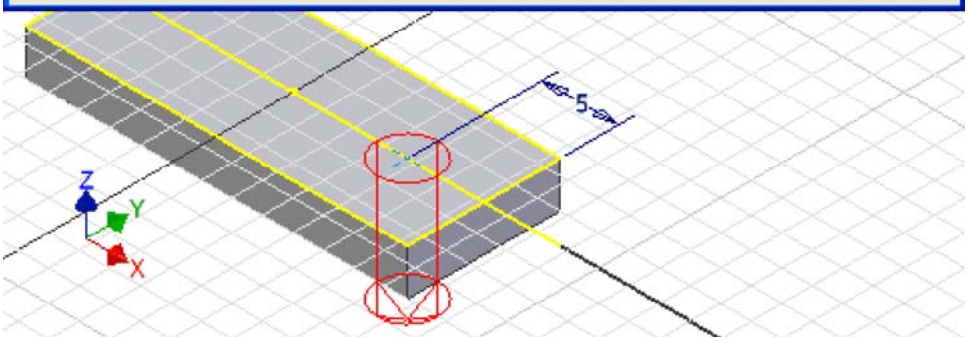
setzen wir dann als Bohrungsmittelpunkt direkt auf die projizierte Linie. Dabei wird automatisch die Koinzidenz-Abhängigkeit erzeugt.
- Die Position des Punktes auf der Linie legen wir durch Bemaßung fest:



Wir platzieren das Bohrungselement auf diesem Mittelpunkt.

- In den Konfigurationsdialog für Bohrungen gelangt man über das ***Kontext-Menü*** > ***Element erstellen*** > ***Bohrung***:





- Da ein Punkt in der Skizze existiert, wird dieser automatisch für die Bohrung gewählt. Sollte dies nicht der Fall sein, muss man dies manuell nachholen.
- Die Bohrung wird als durchgehende Bohrung ohne Gewinde definiert

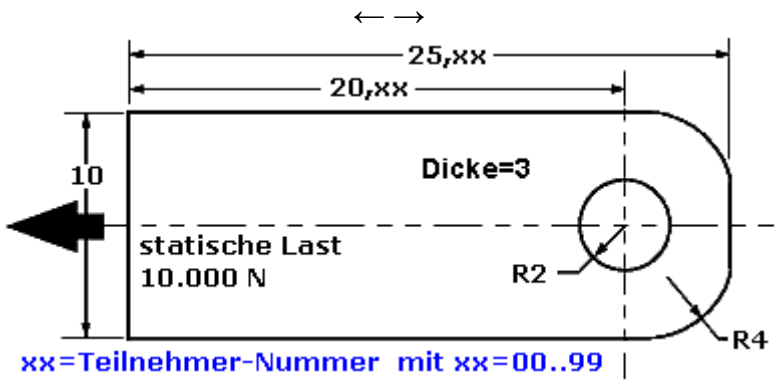
← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Bauteil-Bohrung&oldid=16190“

-

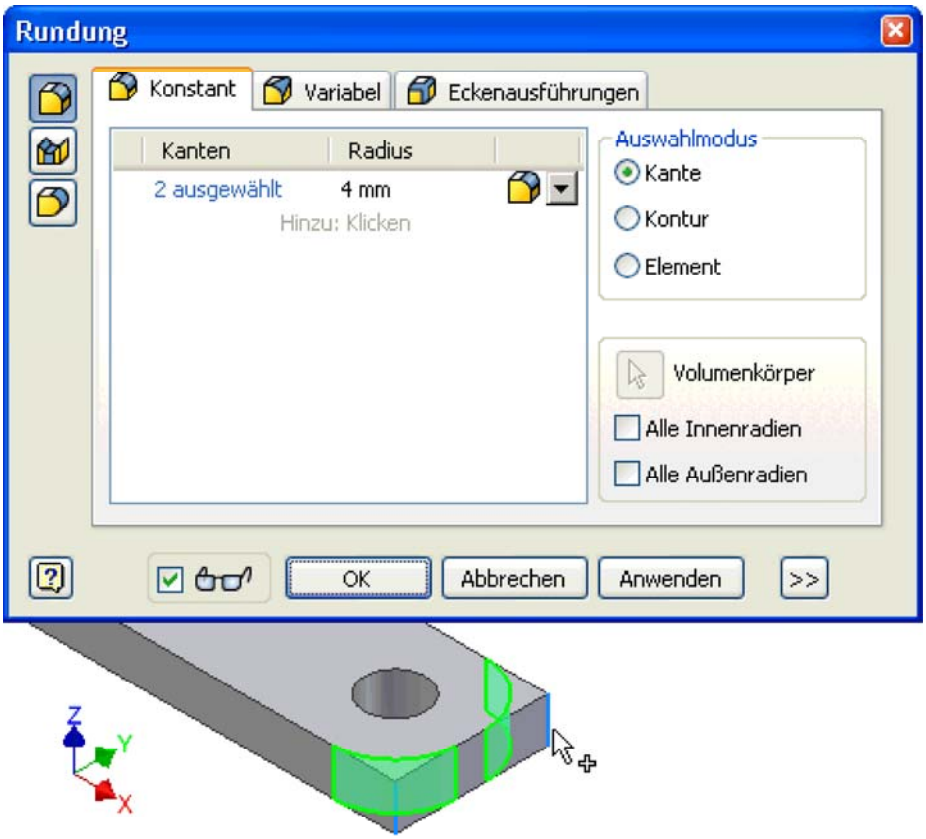
Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Bauteil-Abrundung

Aus OptiYummy
↑



Bauteil-Abrundung (Platziertes Element)

- Kanten sollte man erst bearbeiten, wenn alle anderen Elemente des Bauteils fertig sind.
- Fasen- und Rundungselemente gehören zu den platzierten Elementen. Wie z.B. Bohrungen sind sie in ihrer Form bereits vordefiniert und müssen nur noch parametrisiert werden.
- Wir benutzen eine Rundung mit dem Radius=4 mm, um die fast halbrunde Form an der Lochseite der Lasche zu erzeugen:



- Platzierte Elemente gleicher Art und Größe sollte man gemeinsam als "ein Element" erzeugen. Damit wird die Baumstruktur des CAD-Modells übersichtlicher und spätere Änderungen sind einfacher.

←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Bauteil-Abrundung&oldid=16373“

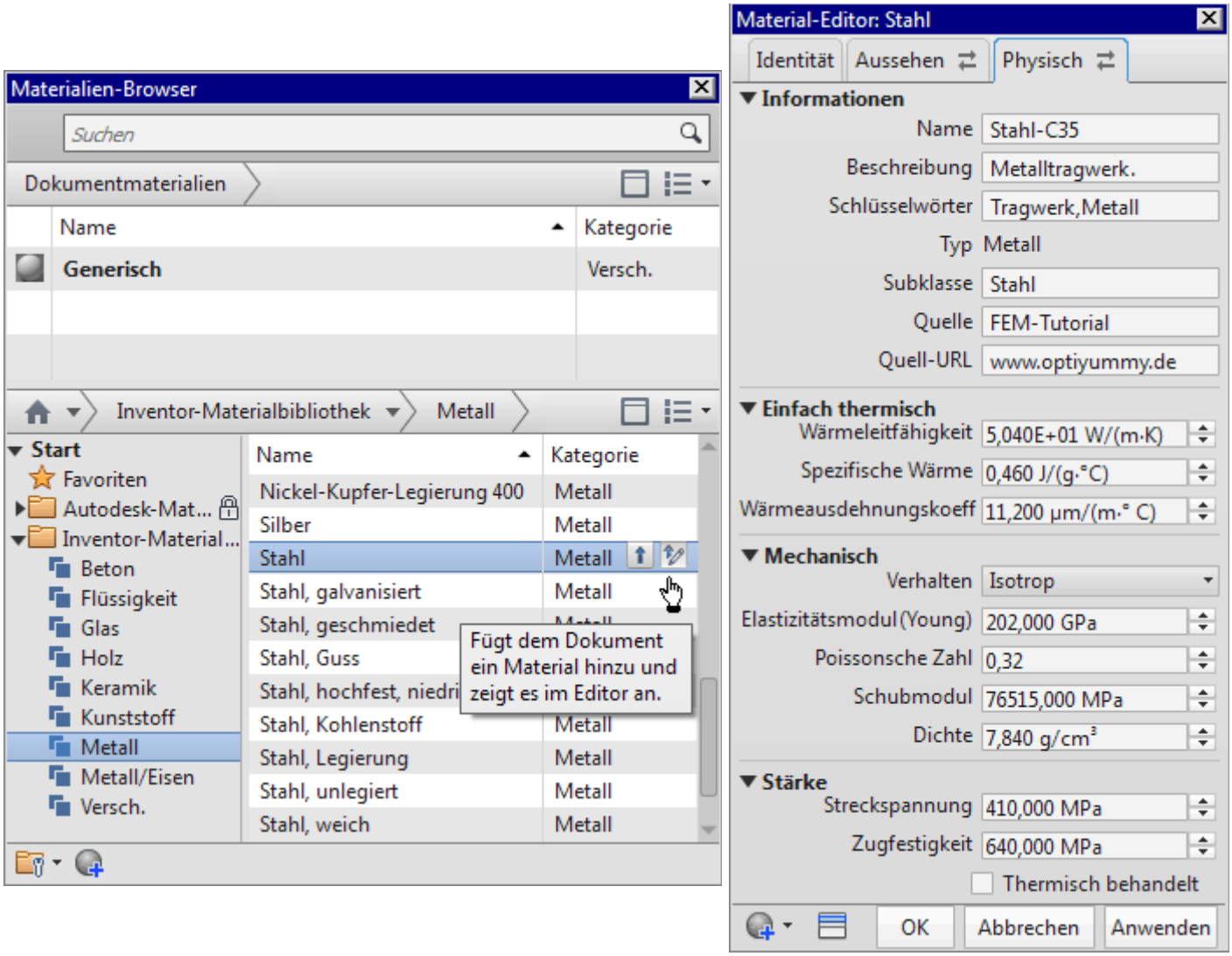
Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Material

Aus OptiYummy
↑

← →

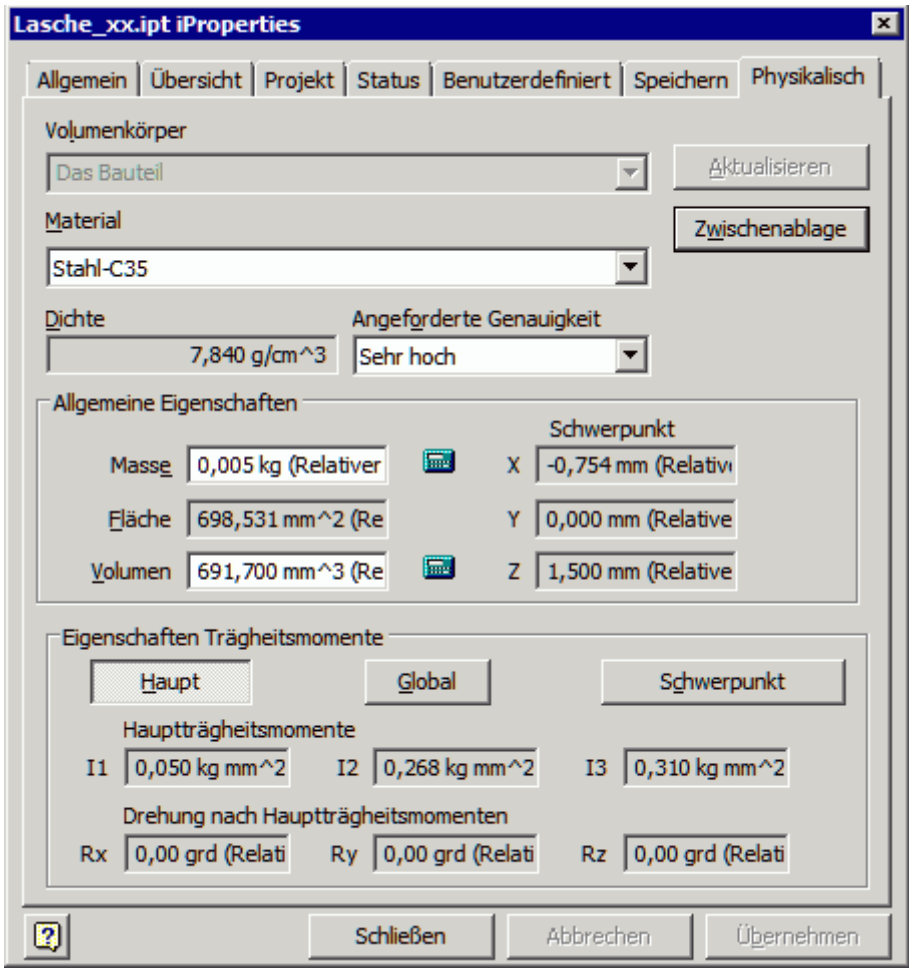
Definition physikalischer Eigenschaften (Material)

Die Daten für unseren Stahl C35 unterscheiden sich von den Einträgen in der mitgelieferten Materialbibliothek! Wir definieren deshalb auf Basis von "Stahl" ein neues Material "Stahl-C35" (***MFL > Extras > Material*** öffnet den Materialien-Browser). Das neue Material wird nur zum Bestandteil des aktuellen CAD-Dokuments. Die gelb markierten Felder des als Basis benutzten Stahl-Materials erhalten die erforderlichen neuen Werte:



Hinweis: Die Werte des **E-Moduls** und des **Schubmoduls** sind über die **Poissonsche Zahl** miteinander verknüpft und können nicht unabhängig voneinander geändert werden.

Mittels **> iProperties > Physikalisch** muss dieses neue Material **Stahl-C35** dem Bauteil noch zugewiesen werden:



Damit ist das CAD-Modell des Bauteils erstellt (Speichern nicht vergessen!). Die nächsten Schritte des FEM-Prozesses führen wir im Folgenden mit *Autodesk Simulation Mechanical* durch.

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Material&oldid=16374“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Modelltransfer

Aus OptiYummy
↑

← →

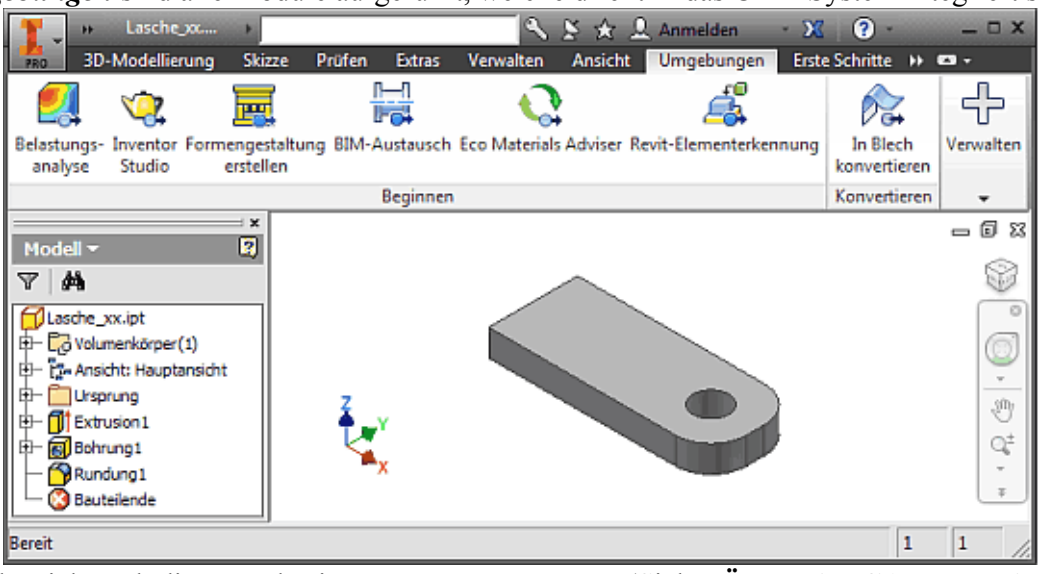
CAD-Modell in FEM-Modul transferieren

Das FEM-Programm *Autodesk Simulation Mechanical* kann man unabhängig vom CAD-Programm *Autodesk Inventor* starten und benutzen. Es zeichnet sich zur Zeit jedoch folgender Trend ab:

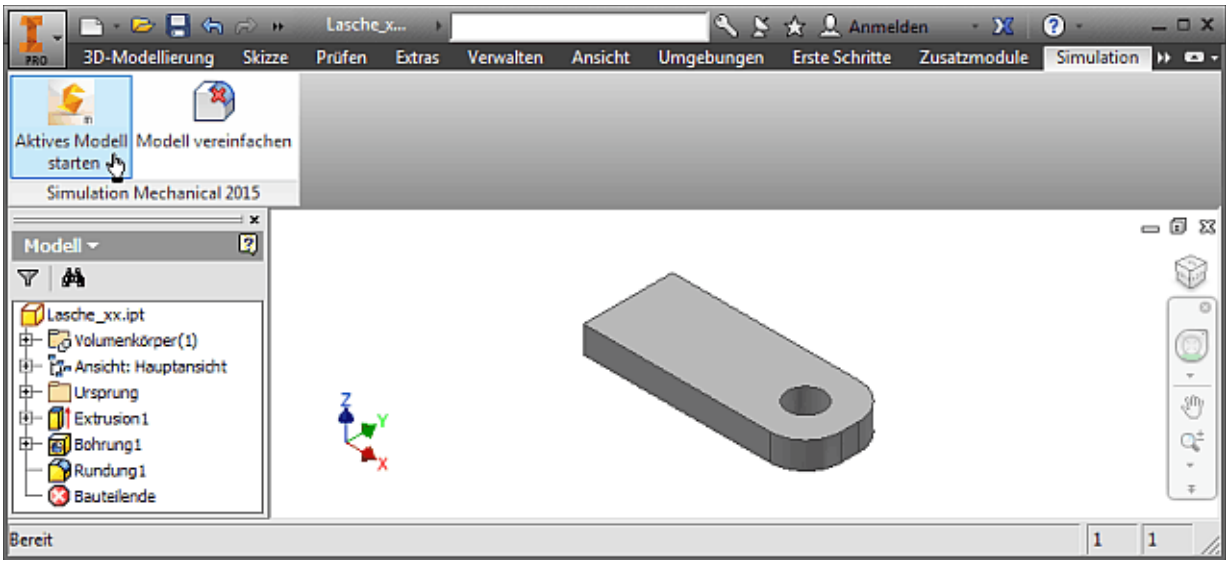
1. Das CAD-Programm besitzt eine zentrale Stellung in einer aus unterschiedlichsten Modulen zusammengesetzten CAD-Suite. Dies ergibt sich aus der vorrangigen Stellung des CAD-Modells im **Produktmodell**.
2. Es wird angestrebt, dass andere Modell-Formen möglichst viele der bereits im CAD-Modell abgebildeten Objekt-Eigenschaften übernehmen. Das trifft auch für die Modell-Form "Finite Element Modell" zu.
3. Für die unterschiedlichen Modell-Formen werden jeweils separate Programm-Module in einer CAD-Suite bereitgestellt. Im Sinne eines durchgängigen Entwurfsprozesses sollte das CAD-Programm die Überführung der CAD-Modell-Eigenschaften in die jeweils zusätzlich benötigte Modell-Form veranlassen.

Das können wir am Beispiel der "Finite Element Simulation" nachvollziehen:

- In ***MFL > Umgebungen*** sind alle Module aufgeführt, welche direkt in das CAD-System integriert sind:

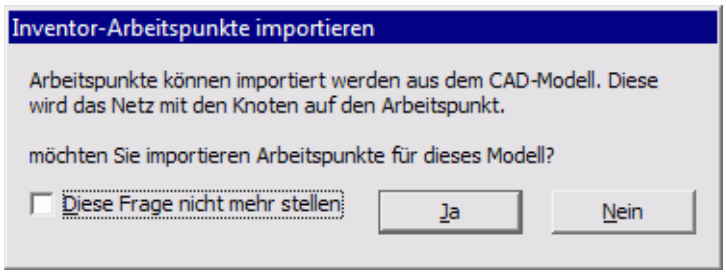


- Darunter befindet sich auch die FEM-basierte **Belastungsanalyse** (Siehe: **Übung im CAD-Tutorials**).
- Wir werden im Rahmen dieses FEM-Tutorials jedoch das externe Zusatzmodul **Simulation Mechanical** benutzen. Für externe Zusatzmodule wird jeweils eine separate Registerkarte angelegt, wenn das zugehörige Programm installiert wurde:



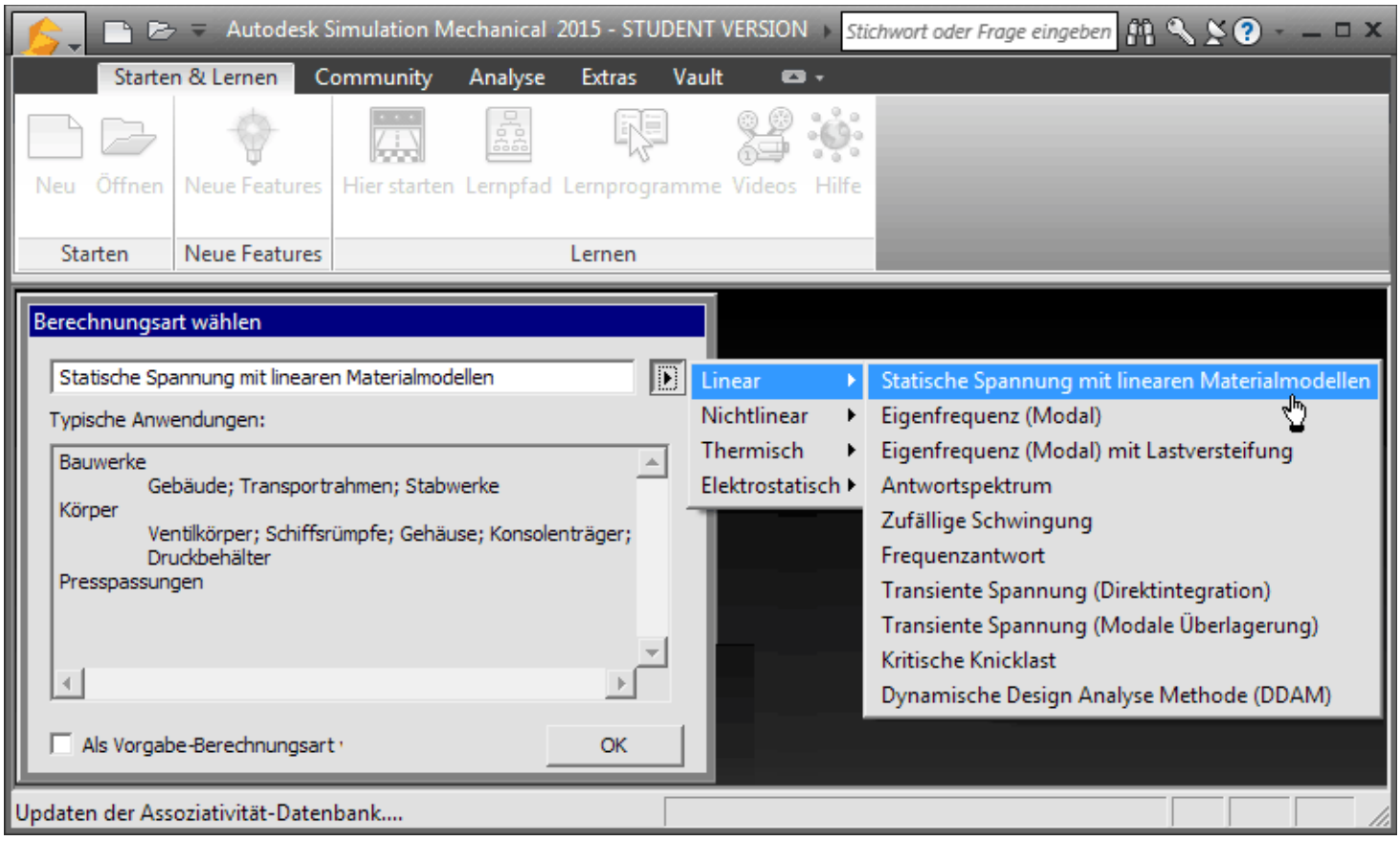
- **Aktives Modell starten** führt zum Start des FEM-Moduls mit dem transferierten CAD-Modell.
- **Modell vereinfachen** ermöglicht bei geometrisch komplizierten CAD-Modellen das Weglassen "unwichtiger" Details für die FEM-Simulation (hier nicht erforderlich).

Beim Start des Transfer-Prozesses erscheint eine (automatisch übersetzte) Abfrage zur Übernahme von Arbeitspunkten aus dem CAD-Modell in das FEM-Modell:


Inventor-Arbeitspunkte importieren
Arbeitspunkte können importiert werden aus dem CAD-Modell. Diese wird das Netz mit den Knoten auf den Arbeitspunkt.
möchten Sie importieren Arbeitspunkte für dieses Modell?
Diese Frage nicht mehr stellen
Ja
Nein

- Es handelt es sich um einen Spezialfall, wenn man bereits im CAD-Modell definierte Arbeitspunkte vorsieht, an denen das FEM-Netz mit einem Knoten verankert werden soll.
- Deshalb beantworten wir die Frage mit **Nein**.

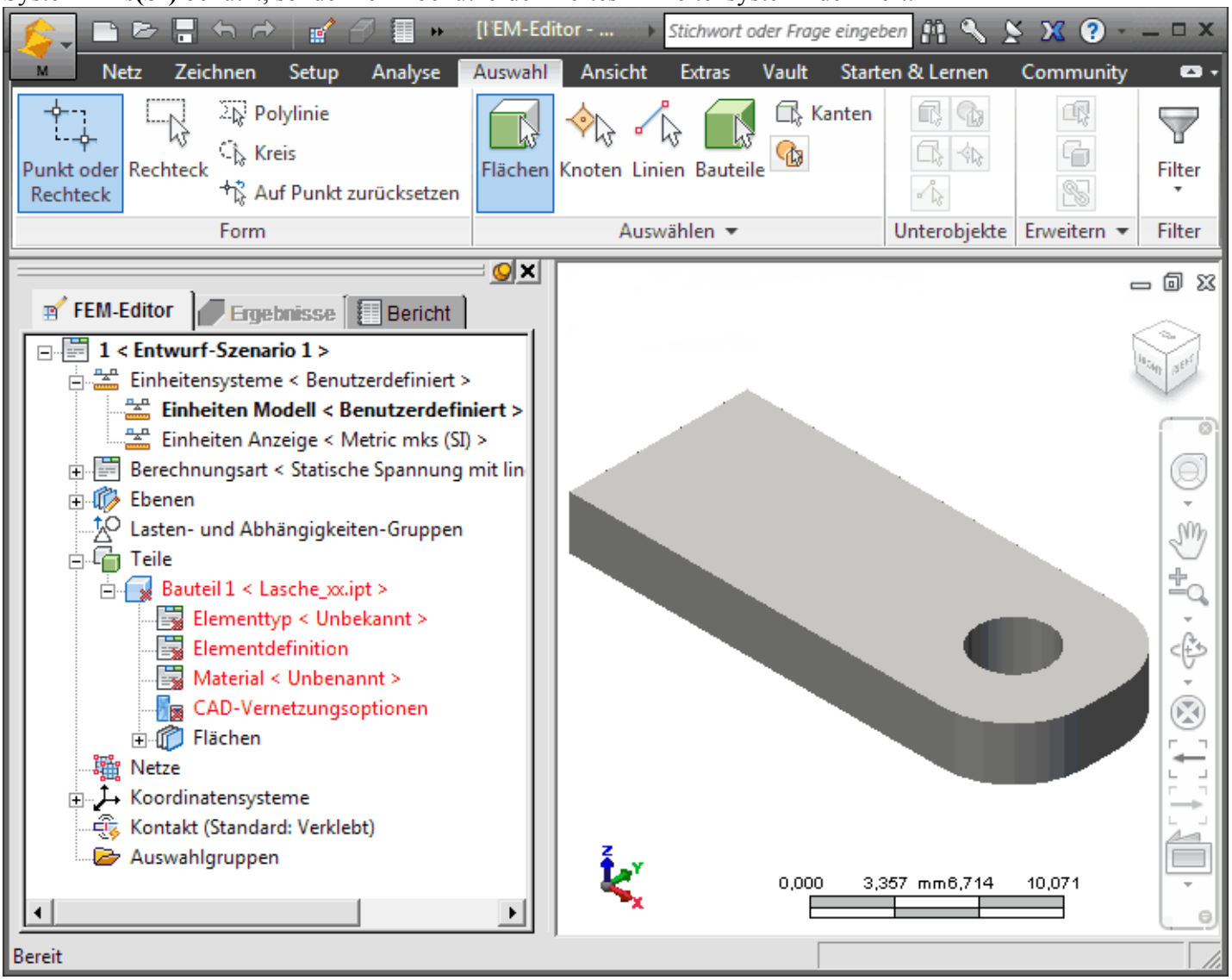
Danach meldet sich das FEM-Programm mit der Frage nach gewünschten Berechnungsart:



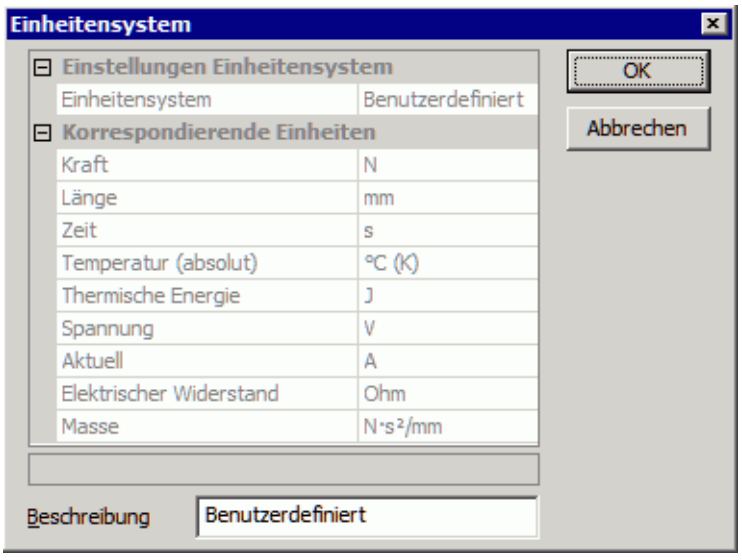
- Ein Blick in die möglichen Berechnungsarten lässt ein beträchtliches Analyse-Potential erahnen.
- Wir wählen die Standard-Einstellung "Statische Spannung mit linearen Materialmodellen".

Vorbereitet für die gewählte Berechnungsart erscheint dann das anhand des CAD-Bauteilmodells generierte FEM-Modell:

- Das FEM-Modell kann nur die Informationen enthalten, welche bereits im CAD-Modell vorhanden sind. Bei einem Bauteil sind das die Geometrie (Form) und die Materialparameter (Stoff).
- Da im Beispiel innerhalb des CAD-Programms die Geometrie in Millimeter gemessen wird, wurde nicht das System **mks(SI)** benutzt, sondern ein "benutzerdefiniertes Einheitensystem" definiert:



- Die automatische Wahl des Modell-Einheitensystems sollte man beibehalten. Statt "Meter" wie bei **mks(SI)** werden alle Abmessungen in "Millimeter" angegeben.
- Das CAD-Programm *Autodesk Inventor* kann man nun schließen.
- Die im CAD-Modell definierten Material-Werte erscheinen noch nicht in der Baumstruktur des FEM-Modells.
- Zum Glück wurden diese Werte jedoch aus dem CAD-Modell übernommen!
- Sie werden erst sichtbar, wenn man den Elementtyp für die Vernetzung spezifiziert hat.



← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Modelltransfer&oldid=16218“

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Netzgenerierung

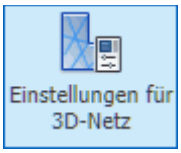
Aus OptiYummy
↑

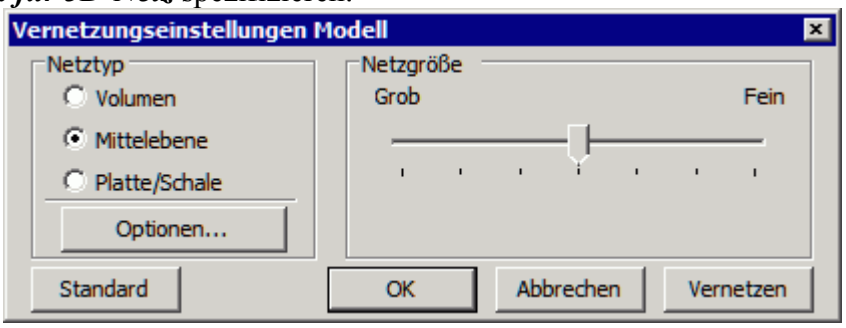
← →

Netzgenerierung

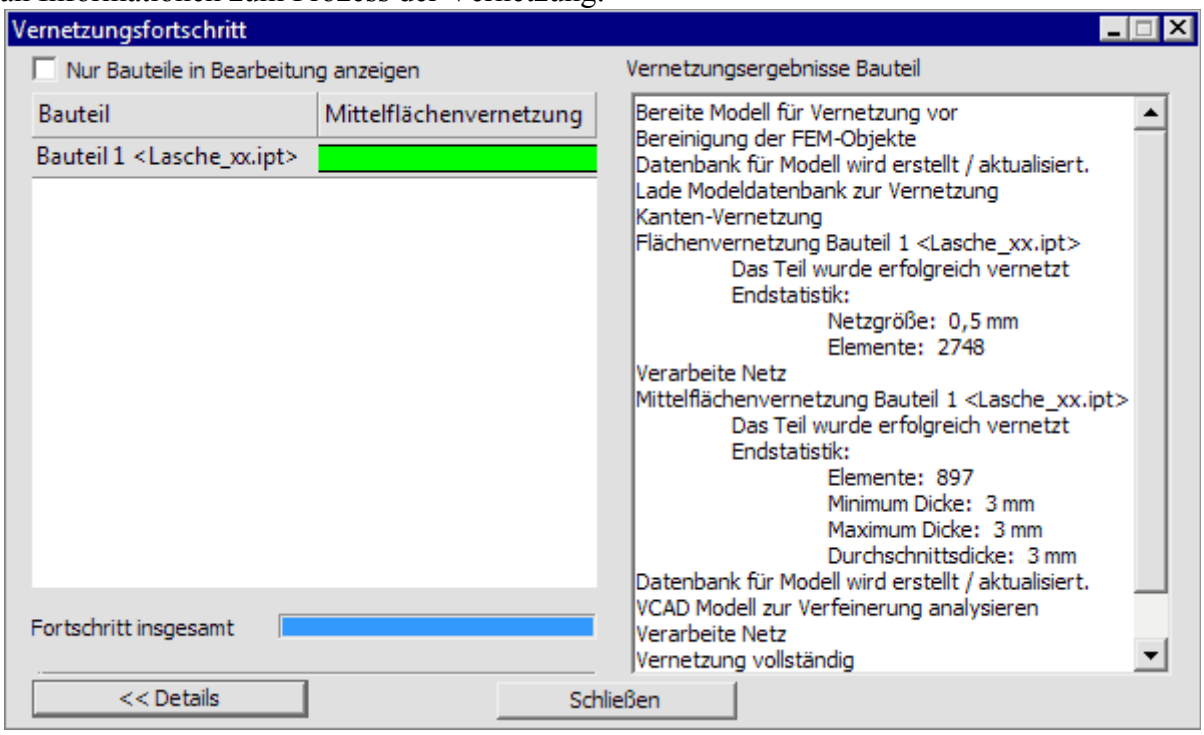
Grundlage des Finite-Element-Modells ist das Netz. Es gibt verschiedene **Möglichkeiten zur Netzerstellung**. Eine naheliegende Variante ist die automatisierte Generierung des Netzes aus dem bereits existierenden CAD-Modell. Bei dem CAD-Modell der Lasche handelt es sich um ein 3D-Volumenmodell. Aufgrund der "Blech-Form" kann man das *Finite Element Modell* jedoch mit einem Flächen-Netz realisieren:

- Dieses Bauteil weist eine gleichmäßige Dicke über die gesamte Grundfläche auf.
- Die Objekthöhe (Dicke) ist in Bezug auf die Länge und Breite des Bauteils klein (im Beispiel 3/10).
- Ein Richtwert für kleine Verhältnis-Werte ist 1/10. Wir betrachten 3/10 trotzdem noch als "klein".
- Im *Autodesk Simulation Mechanical* existiert die Möglichkeit, dünnwandige Bauteile entlang ihrer Mittelebene mit Flächen-Elementen zu vernetzen. Dies muss man unter ***MFL > Netz > Einstellungen für 3D-Netz*** spezifizieren:





- Man wählt **Mittelebene**, wenn das Modell ein flaches und dünnes 3D-Volumenmodell ist und deshalb mithilfe von Schalen- oder Membran-Elementen analysiert werden kann. Der Festkörper wird dabei entlang seiner Mittelebene auf Flächen-Elemente reduziert (Standard=Schalen-Elemente).
- Die Vorgabe für die Netzgröße und die Optionen verändern wir vorläufig nicht, um ein Gefühl für die Standard-Vernetzung zu erhalten.
- Wenn man nach dem Drücken des Buttons **Vernetzen** im Fortschrittsfenster den Button **Details** betätigt, erhält man Informationen zum Prozess der Vernetzung:

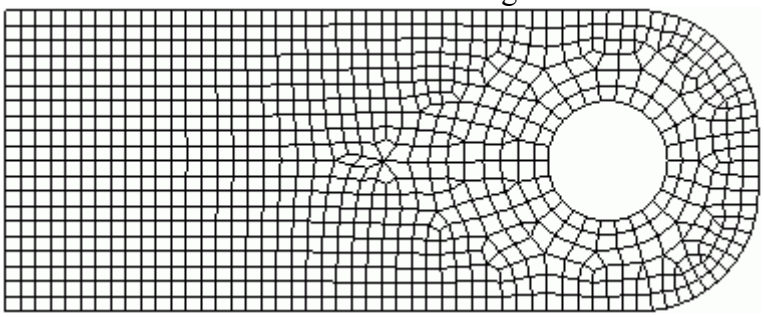


- Die aktuelle globale Elementgröße wird aus dem eingestellten Feinheitsgrad der Netzgröße und den maximalen Bauteilabmessungen ermittelt (Standard-Feinheit führt zu 1/50 der Maximal-Abmessung (0,5 mm bei 25 mm Bauteil-Länge)
- Mit dieser Elementgröße werden in einem ersten Schritt alle Kanten des Bauteils vernetzt (= Ermittlung der Elementzahl pro Kante).
- Im nächsten Schritt wird auf allen Flächen des Bauteils zwischen den Kanten-Elementen ein Netz aufgespannt. Dafür werden soweit als möglich Quad-Elemente verwendet. Erforderliche Übergänge zwischen unterschiedlich vernetzten Kanten werden durch möglichst wenige zusätzliche Dreieckselemente realisiert. Im Beispiel enthält das gesamte Oberflächennetz des Bauteils 2748 Elemente.
- Im abschließenden Schritt erfolgt die Generierung der Mittelebene. In unserem Beispiel ist das einfach die Symmetrieebene in dem Bauteil. Aber der benutzte Algorithmus arbeitet universell auch für gekrümmte Blechformen mit variabler Blechdicke. Standardmäßig wird bei der Mittelflächenvernetzung jede Fläche des Bauteils durchsucht und die Mittelebene entlang der kleinsten erkannten Dicke gebildet. Nach welchen Prinzipien diese Mittelebene vernetzt wird, geht aus dem **Benutzerhandbuch** nicht hervor. Irgendwie muss das Ergebnis der vorherigen Oberflächenvernetzung jedoch in das Mittelflächen-Netz einfließen, wobei hierbei ein Optimierungsprozess stattfindet. Im Beispiel ergaben sich 897 Elemente in dem Netz der Mittelebene.

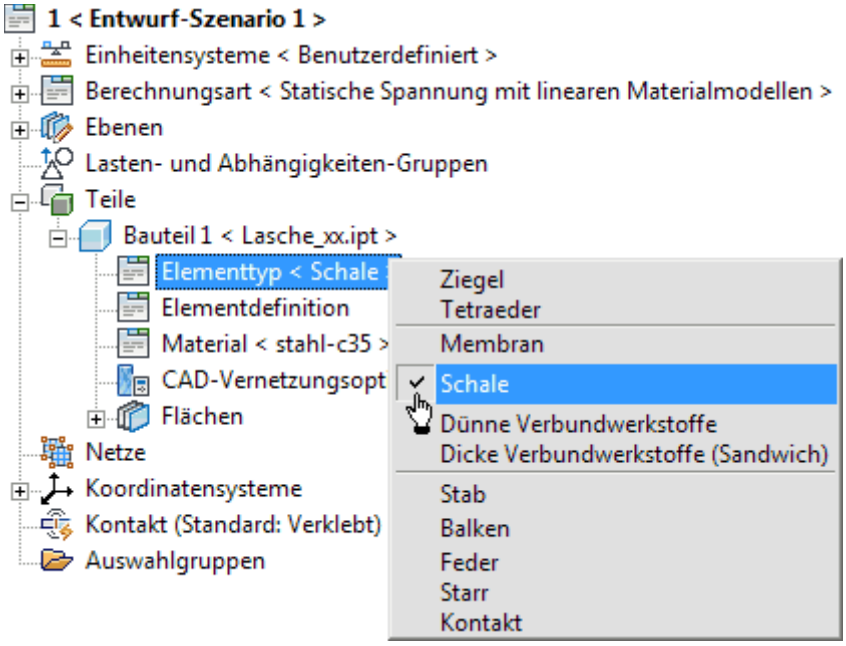
Nach dem Schließen des Fortschrittsfensters lassen wir uns für die Netzerzeugung die "Netzergebnisse anzeigen". Diese beinhalten die Statistik zur Mittelebenen-Vernetzung des Bauteils:

Mesh operation	Midplane mesh
Mesh algorithm	Standard
Element type	Plate/shell
Elements created	897
Minimum thickness	3 mm
Maximum thickness	3 mm
Average thickness	3 mm

Als Ergebnis entsteht das generierte Mittelflächen-Netz als Grundlage des Finite-Element-Modells:



Nach der Vernetzung stehen die Netzbestandteile (einschließlich des Materials) in der Baumstruktur des FEM-Editors zur Verfügung:



- Als **Elementtyp** wurde **Schale** benutzt. Ein Blick in das zugehörige Kontextmenü zeigt die möglichen Elementtypen. Als weiterer Flächen-Elementtyp steht für die Mittelebene nur **Membran** zu Verfügung (nicht umschalten!), den **Verbundwerkstoff-Elemente** sind spezielle Formen von Schalen-Elementen.
- Je nach Art der Freiheitsgrade unterscheidet man allgemein für Finite-Elemente-Netze drei Typen von Flächen-Elementen. Allen Flächen-Elementen ist gemeinsam, dass ihre Dicke auch bei Elementdehnung konstant bleibt:

Platten-Element

- kann nur Belastungen senkrecht zu seiner Ebene aufnehmen,
- es entstehen Biegespannungen und Schubspannungen
- *Hinweis:* wird entgegen der "Theorie" in *Autodesk Simulation Mechanical* als Synonym für Schalen-Element benutzt (obwohl es sich um einen Spezialfall des allgemeineren Schalen-Elements handelt).

Membran-Element

- kann nur Belastungen in der Membran-Ebene aufnehmen,
- kann kein Biegemoment aufnehmen,
- kann auch gekrümmt sein
- ***Scheiben*** sind ein ebener Spezialfall von Membranen (ohne Krümmung)

Schalen-Element

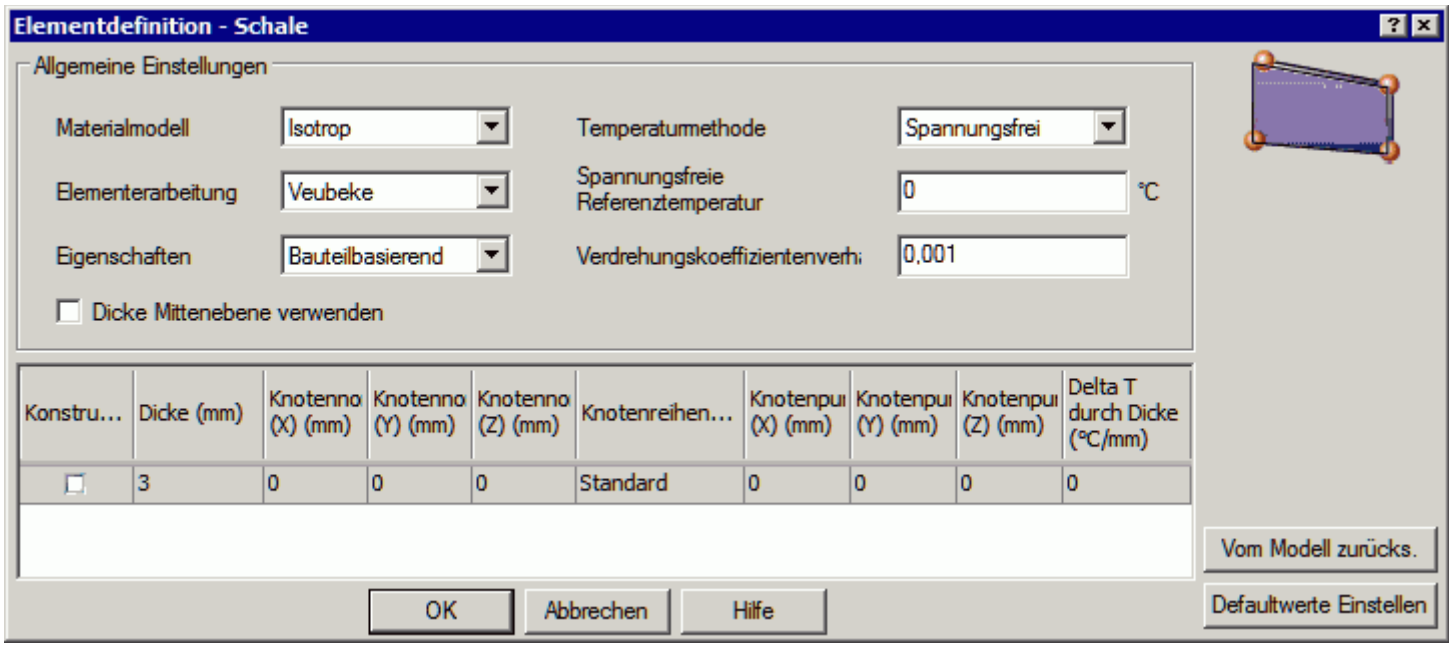
- kann beliebige Belastungen aufnehmen,
- Verdrehung um den Normalenvektor der Element-Fläche wird nicht berücksichtigt,
- kann sich krümmen,
- stellt eine Kombination von Platte und Membran dar.

Da wir den Blechstreifen nur mit einer Zugkraft entlang der Mittelebene belasten und er sich dabei nicht krümmt, könnte man Membran-Elemente verwenden. Scheiben-Elemente würden dafür auch ausreichen, werden vom *Autodesk Simulation Mechanical* aber nicht angeboten. Wir benutzen die Schalen-Elemente, um eine universelle Belastung auch schräg zur Mittelebene zu ermöglichen!

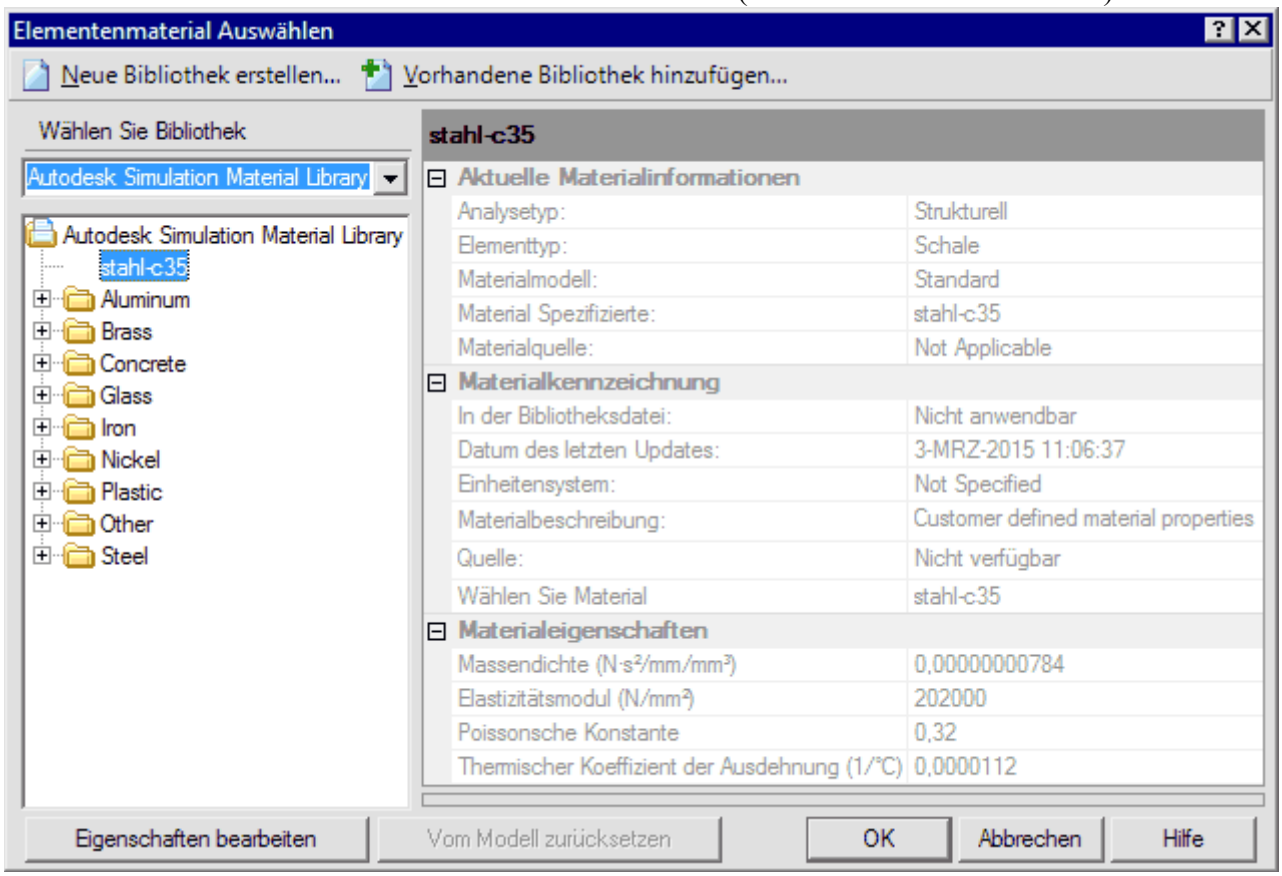
Hinweis:

- Obige Flächen-Elemente (auch "planare Elemente" genannt) sind keine 2D-Elemente! Planare Elemente sind eine Sonderform der 3D-Elemente, denn damit können beliebig im Raum gekrümmte, dünne (blechförmige) Geometrien vernetzt werden.
- 2D-Elemente können nur in der YZ-Ebene aufgespannt werden. Dabei werden nur zwei Freiheitsgrade berücksichtigt - die Y- und die Z-Verschiebung. Mit den 2D-Netzen beschäftigen wir uns später noch intensiv.

Die **Elementdefinition** kann man Bearbeiten (Kontextmenü). Wir werfen hier nur einen Blick in die umfangreichen Konfigurationsmöglichkeiten:

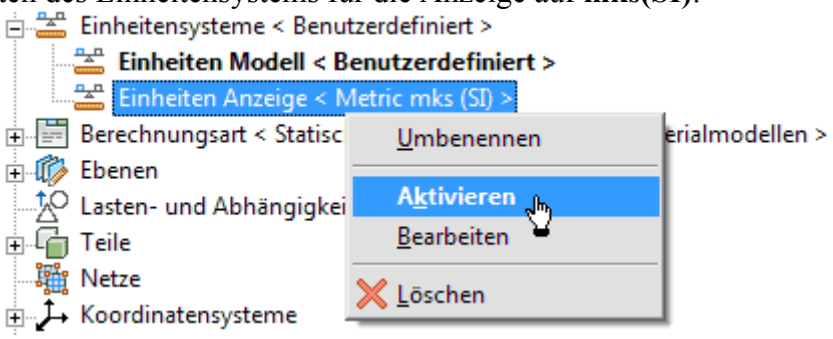


Das **Material** "stahl-c35" wurde vom CAD-Modell übernommen (***Kontextmenü > Bearbeiten***):



Insbesondere bei den Materialeigenschaften Massedichte und E-Modul erkennt man die Wirkung des benutzten Einheitensystems:

- Die Angabe des **E-Moduls** in **N/mm²** ist gebräuchlich, die der Massedichte in **N·s²/mm/mm³** nicht.
- Hier hilft das Umschalten des Einheitensystems für die Anzeige auf **mks(SI)**:



- Dabei bleibt das Modell-Einheitensystem im internen FEM-Modell erhalten, aber alle In-/Outputwerte gehen über ein Filter. In Eingabemasken und Ergebnis-Präsentationen arbeitet man mit dem aktiven Anzeige-Einheitensystem. Erneutes "Bearbeiten" der Materialwerte zeigt nun die vertrauten Zahlenwerte:

Materialeigenschaften	
Massendichte (kg/m³)	7840
Elastizitätsmodul (N/m²)	202000000000
Poisson-Koeffizient	0,32
Thermischer Koeffizient der Ausdehnung (1/°C)	0,0000112
Scher-Elastizitätsmodul (N/m²)	0

- ***Hinweis:*** Der **Scher-Elastizitätsmodul G** besitzt den Wert Null, weil dieser Wert über den **Poisson-Koeffizent *v*** mit dem **Elastizitätsmodul E** verknüpft ist: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Netzgenerierung&oldid=16243“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Loads

Aus OptiYummy
↑

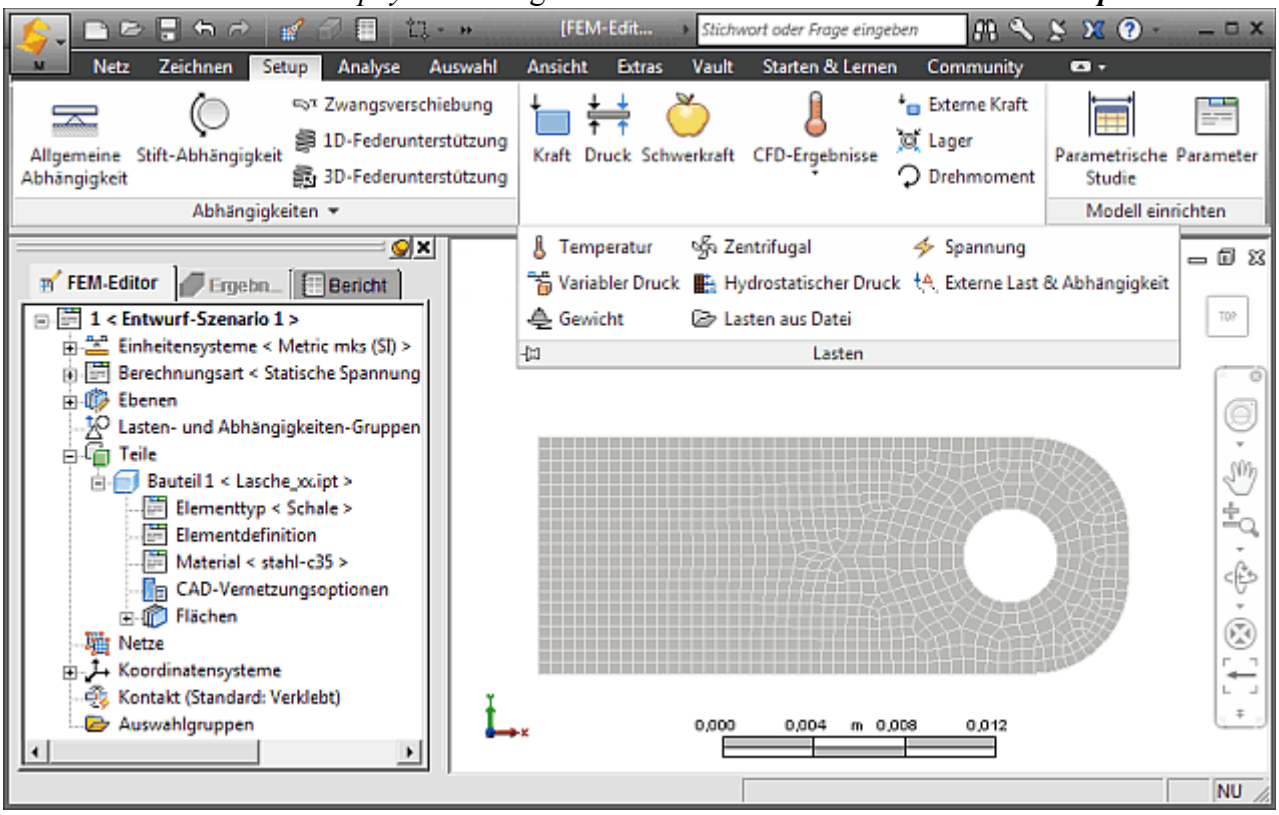
← →

Hinzufügen der Lasten (Loads)

- Lasten sind die auf das Bauteil wirkenden Kräfte bzw. Momente. Neben der direkten Wirkung einer Kraft können Lasten auch aus weiteren Ursachen resultieren:

  1. Druckbelastung einer Fläche.
  2. Wirken einer translatorischen Beschleunigung (z.B. Gravitation) auf die Masse des Bauteils.
  3. Wirken einer Drehbeschleunigung infolge Rotation des Bauteils auf die Drehträgheit des Bauteils.

- Die in *Autodesk Simulation Multiphysics* verfügbaren Lasten findet man unter ***MFL > Setup > Lasten***:



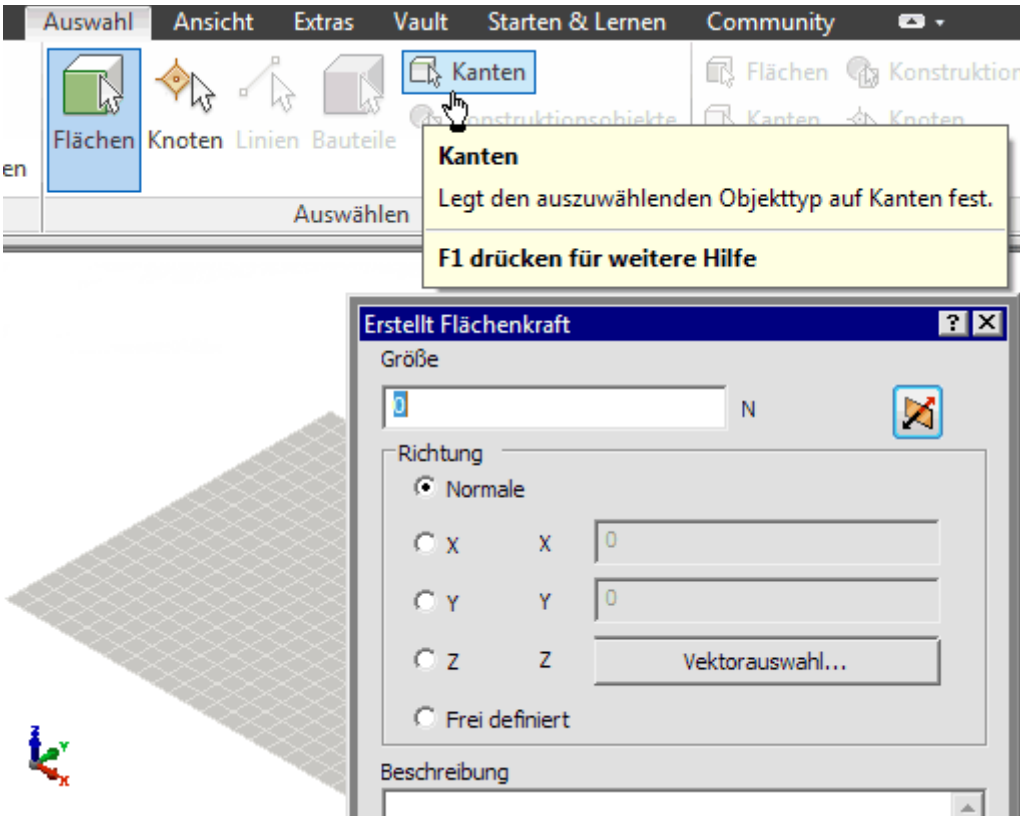
Es gibt zwei Wege, um eine Kraft auf das FEM-Netz wirken zu lassen:

1. Zuerst Aktivieren der Kraft-Funktion (z.B. über die ***MFL***), danach Festlegen der Kraft-Angriffspositionen auf dem Netz (Flächen, Kanten oder Knoten) und Definieren des Kraftvektors.
2. Zuerst Auswahl der Orte auf dem Netz (Flächen, Kanten oder Knoten), danach Definieren des Kraftvektors.

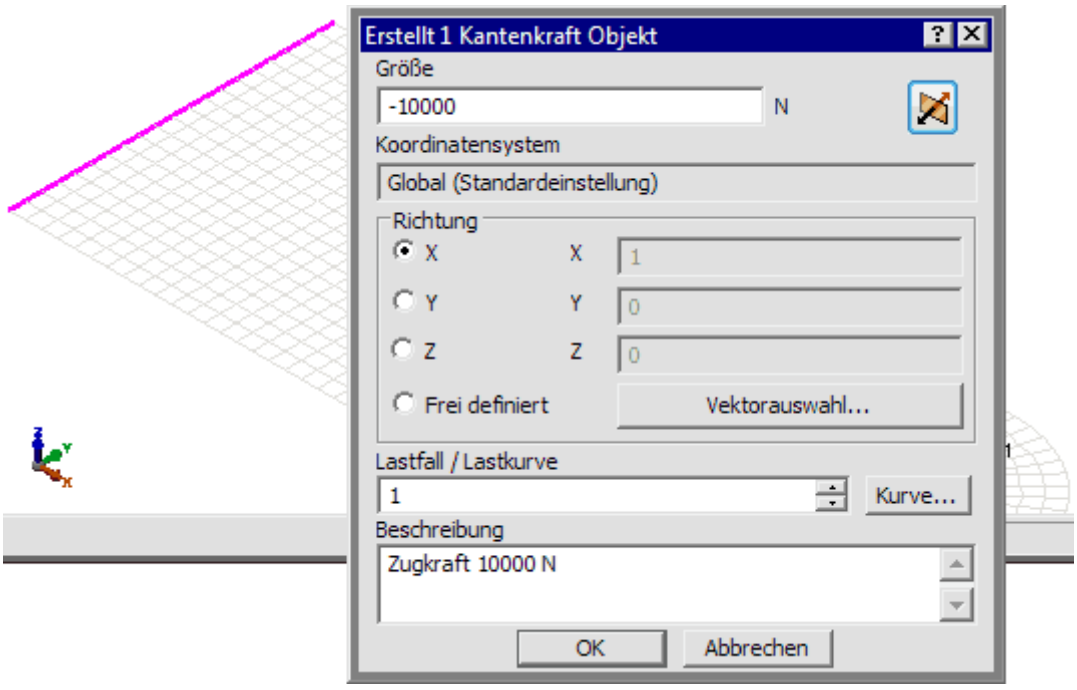
Die Zugkraft in Längsrichtung der Lasche soll gleichmäßig über der ganzen Querschnittsfläche wirken. Wenn wir die Kraft auf die entsprechende Kante des 2D-Netzes positionieren, so gewährleistet der FEM-Editor die gleichmäßige Aufteilung der Kraft auf alle Knoten/Elemente (im Sinne einer "Druck"-Belastung):

Wir verwenden im Beispiel den ersten Weg, obwohl der zweite Weg meist komfortabler ist:

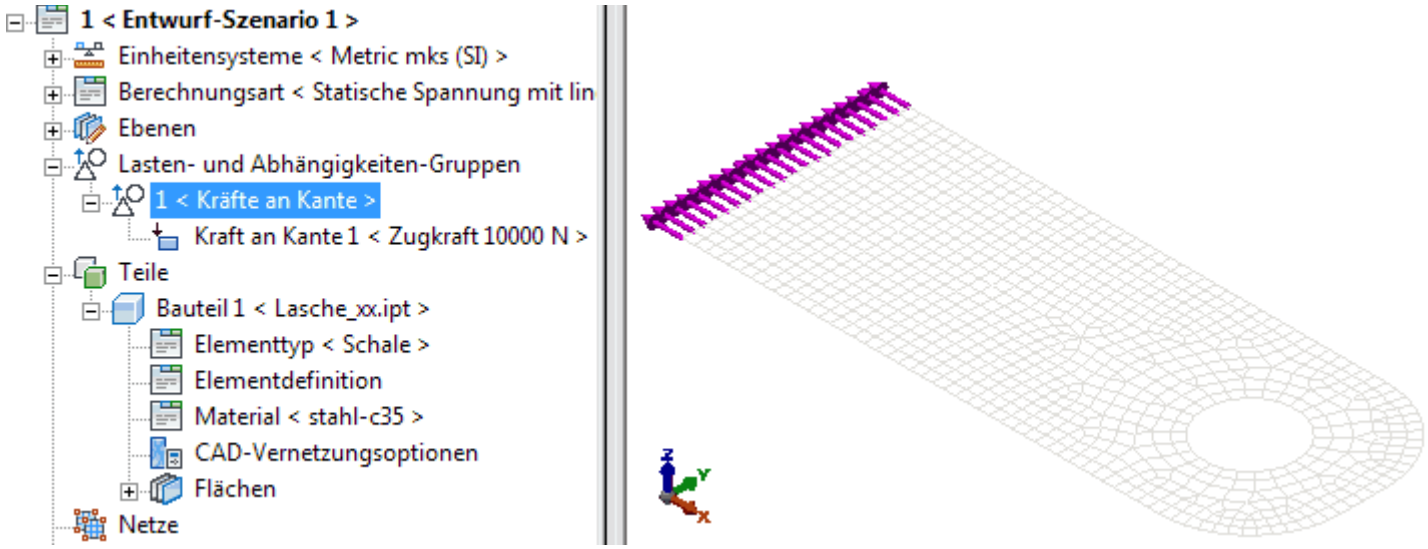
- Aktivieren der Kraft-Funktion (***MFL > Setup > Lasten > Kraft***).
- Die Wahl der gewünschten Kante ist nur möglich, wenn man sich bereits im Kanten-Auswahl-Modus befindet. Standardmäßig ist der Flächen-Auswahl-Modus aktiv. Deshalb muss man zuvor die Kantenwahl über ***MFL > Auswahl > Kanten*** aktivieren:



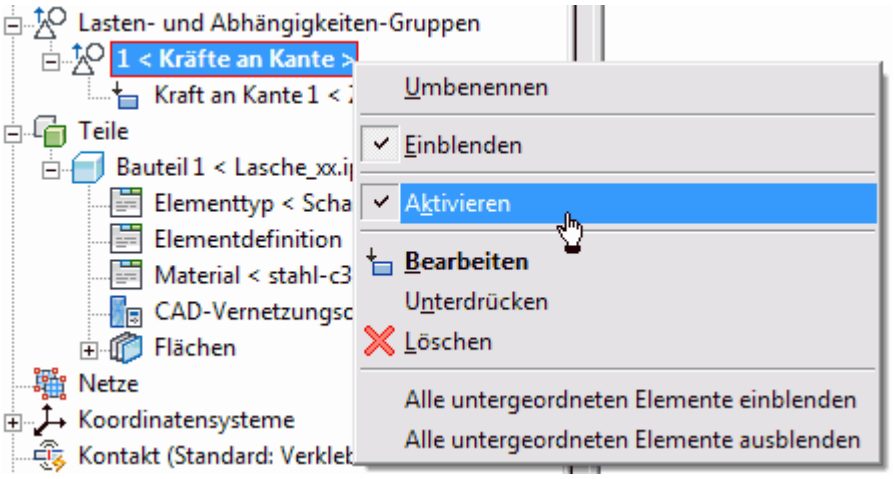
- Nach Auswahl der Kante kann man den Vektor der Kraft definieren:



- In der Baumstruktur des FEM-Editors wird dafür eine Lastengruppe angelegt:



- Eine Lastengruppe ist die Analogie zum sogenannten Lastfall in anderen FEM-Programmen. Damit die darin enthaltenen Lasten bei der Simulation berücksichtigt werden, muss man die Gruppe aktivieren:



←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Loads&oldid=16258“

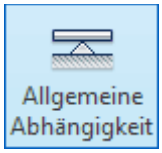
-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Constraints

Aus OptiYummy
↑

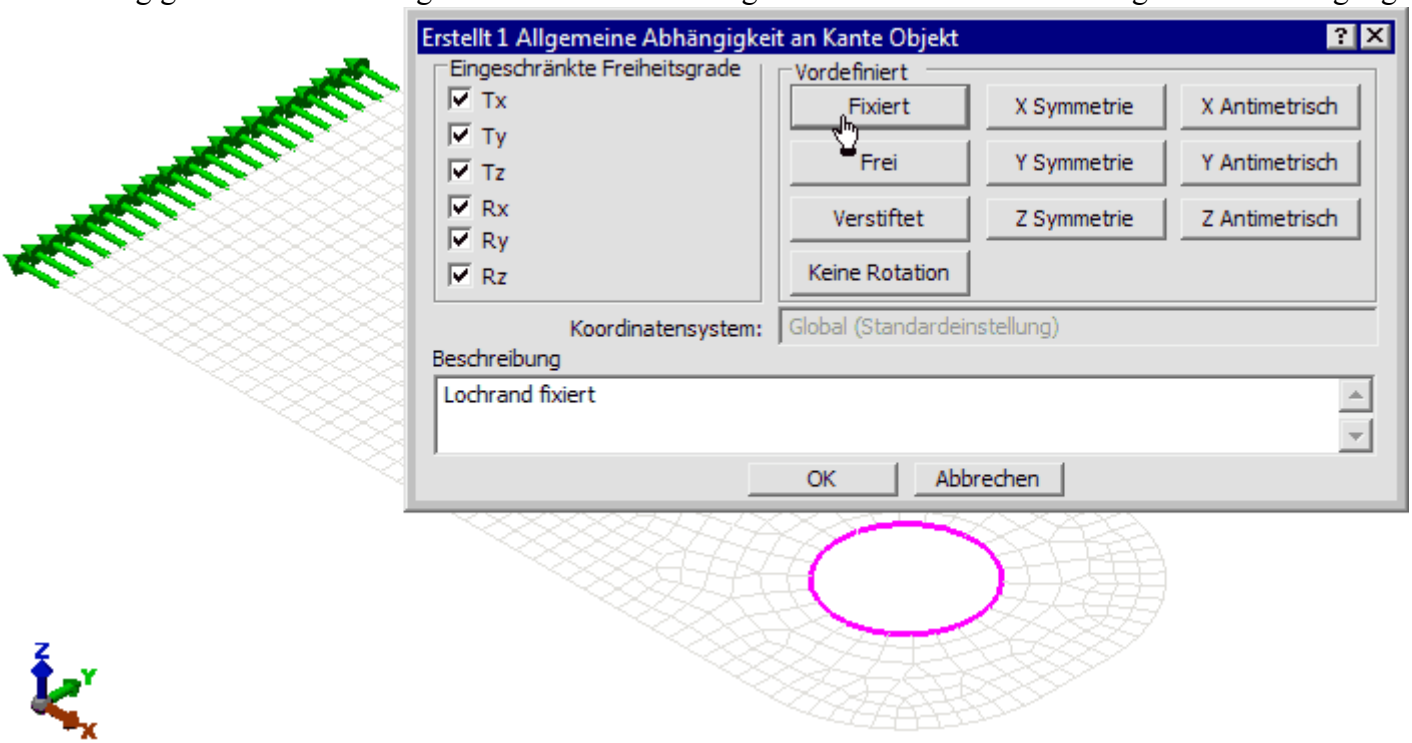
← →

Randbedingungen definieren (Constraints)



Abhängigkeiten (*Constraints*) schränken die **Freiheitsgrade** von Teilen des Netzes ein. Im Beispiel soll die gesamte innere Fläche des Loches starr mit einem bedeutend härteren Bolzenmaterial verschweißt sein. Der Lochrand ist also praktisch fest:

- Mit ***MFL > Setup > Allgemeine Abhängigkeit*** fixieren wir die Knoten des Lochrandes.
- ***Hinweis:*** Falls man sich nicht im Kantenauswahl-Modus befindet, muss man diesen über ***MFL > Auswahl > Kanten*** aktivieren.
- Die Abhängigkeit **Fixiert** beseitigt für die Knoten auf der gewählten Kante alle Freiheitsgrade der Bewegung:



- Für den fixierten Lochrand wird eine Abhängigkeit in der Baumstruktur des FEM-Modells angelegt:

- Dafür wird eine eigene Gruppe angelegt, wie dies im obigen Bild gezeigt ist.
- Man kann diese neue Gruppe einfach mit dem Cursor in die erste Gruppe verschieben. Dies ist sinnvoll, weil im Beispiel sowohl die Kraft, als auch die Fixierung des Lochrandes aktiv sein müssen.

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Constraints&oldid=16376“

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Belastungsanalyse

Aus OptiYummy
↑

← →

Belastungsanalyse

Unser Finite-Elemente-Modell ist nun fertig, wir erreichten dies in folgenden Schritten innerhalb des **Preprocessing**:

1. Erstellen der Geometrie (Gerüst für das Finite-Element-Netz!)

- Entwickeln eines CAD-Modells des Bauteils (im CAD-Programm)
- Überführung des CAD-Modells als Geometrie in das FEM-Programm.
- Wahl eines sinnvollen Maßsystems

2. Zuweisung physikalischer Eigenschaften und Vernetzung

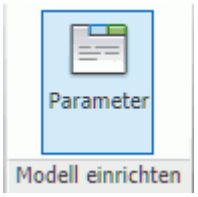
- Benutzung der Materialwerte aus dem CAD-Modell für die Netz-Elemente (Werte meist Bestandteil einer Material-Bibliothek).
- Verknüpfung von Element-Typen (Properties) und Materialien zu Element-Eigenschaften. Die Wahl der Element-Typen richtet sich nach der Netz-Dimension (Stab, Fläche, Körper) und der zu berücksichtigenden Belastungen (z.B. für Flächen: Membran, Platte, Schale).
- Vernetzung entsprechend der zu erwartenden Feldgradienten und den allgemeinen Regeln der Vernetzung.

3. Definieren von Loads / Constraints

- Definieren von Belastungsfällen (*Load Sets*) und Zuweisen der zugehörigen äußeren Belastungen (Flussgrößen in Knoten bzw. Elemente hinein, z.B. Kräfte, Ströme).
- Definieren von "Einspann"-Fällen (*Constraint Sets*) und Zuweisen der konkreten Zwangsbedingungen (Potentialgrößen vorgeben - schränken die Freiheitsgrade von Teilen des Netzes ein = "Auflager").

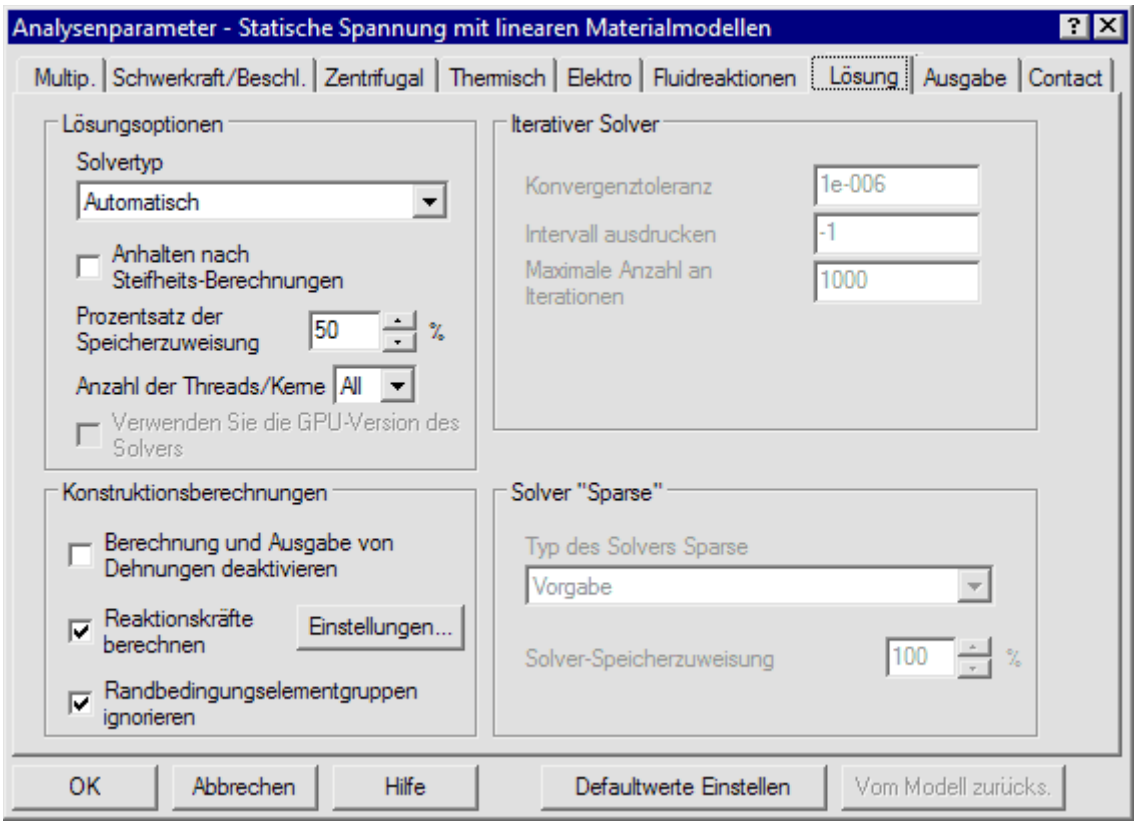
Hinweis:
Die Funktionen des netzspezifischen ***Preprocessing*** konzentrieren sich im *Autodesk Simulation Mechanical* in der ***MFL***-Registerkarte ***Setup***.

Solver-Konfiguration



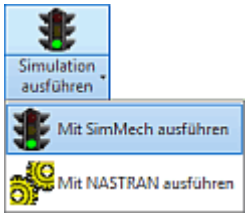
Die **Analyse** beruht auf der Simulation des konfigurierten FEM-Modells mit Hilfe eines Solvers. Dabei werden für ein oder mehrere Lastfälle die Ergebnisdaten berechnet:

- In ***MFL > Setup*** kann man auch die globalen **Parameter** für das **Modell einrichten**. Neben den globalen Belastungen des Modells (Schwerkraft, Drehbeschleunigungen, Temperatur, elektrische Spannung) betrifft dies die Konfiguration des Solvers und der Ergebnisse.
- Wir benutzen vorläufig überall die Standardvorgaben. Die Solverkonfiguration findet man in der Registerkarte ***Lösung***:

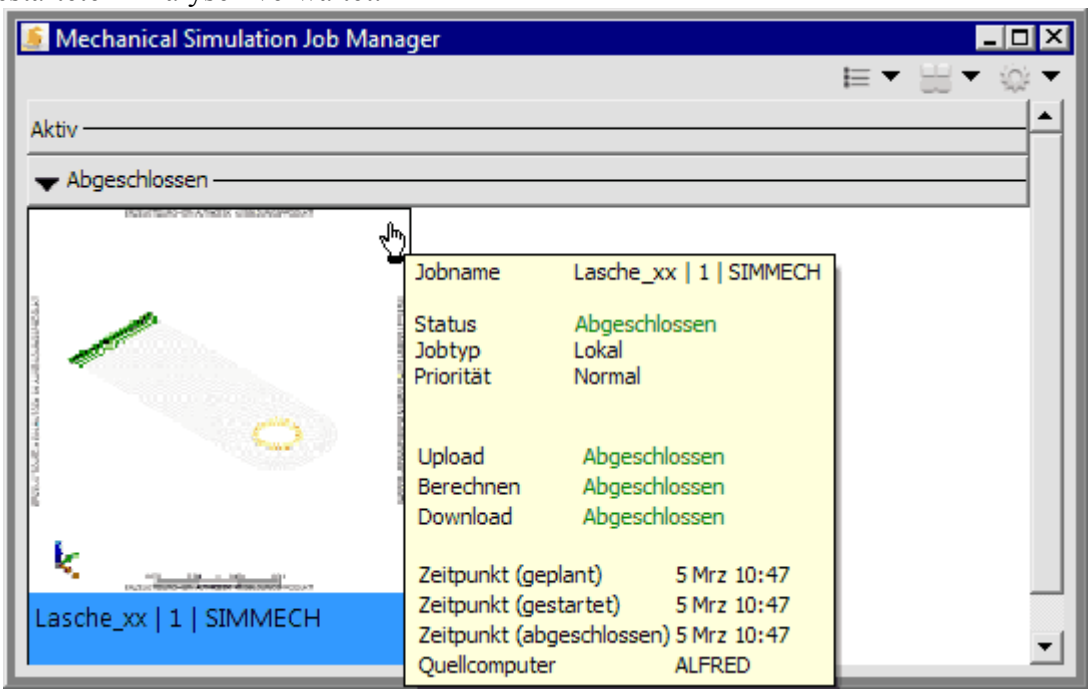


Simulation mit Standard-Vernetzung

MFL > Analyse > Simulation Ausführen startet die Simulation.
Hinweis: In der Übung benutzen wir nur den *Autodesk* "**SimMech-Solver**", da dieser viel effektiver als der **NASTRAN**-Solver arbeitet:

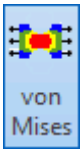


- Es öffnet sich der **Job-Manager** (Siehe: **Onlinehilfe**), welcher den Status sämtlicher gestarteten Analysen verwaltet:

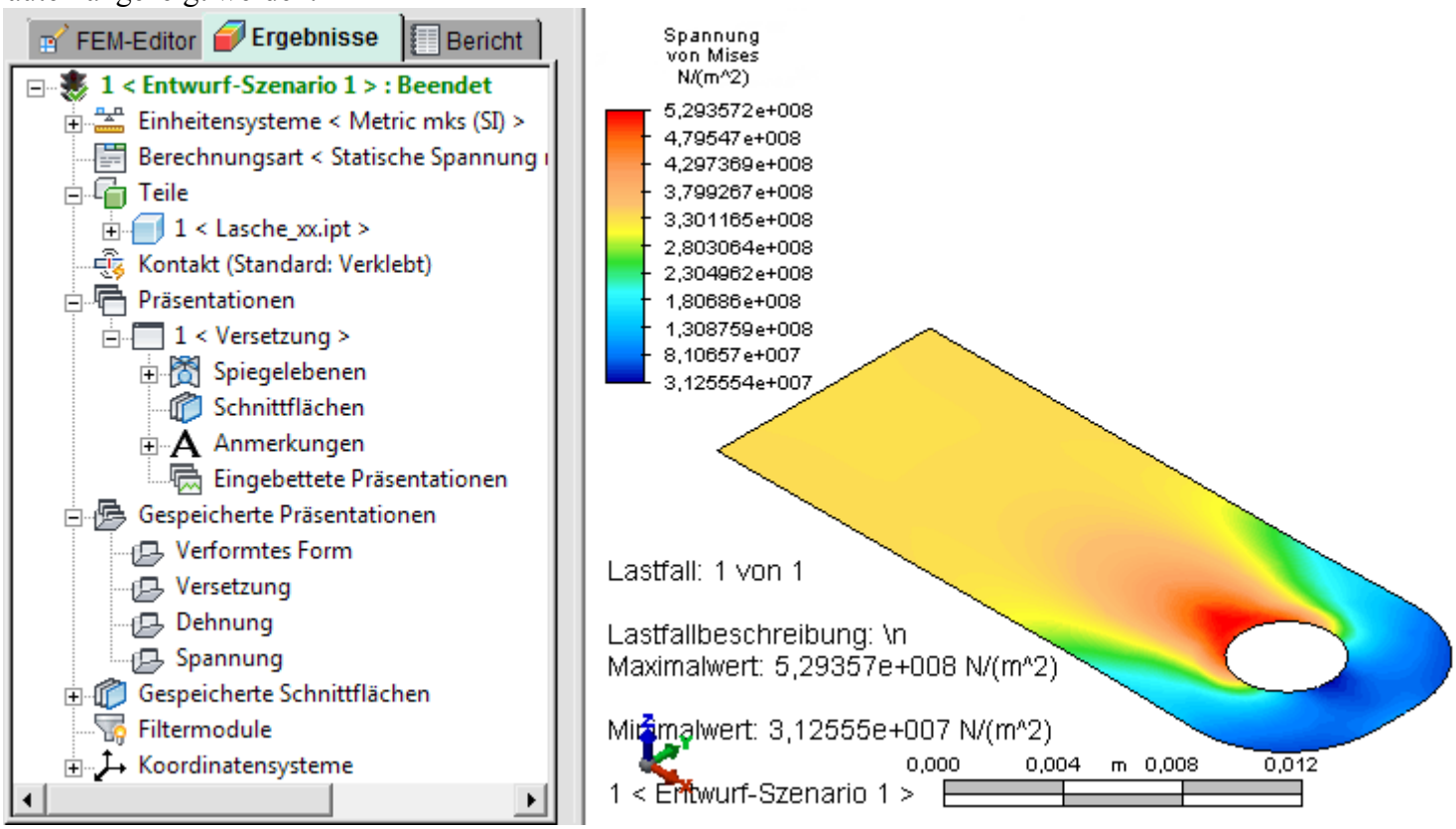


- Auf Grund der geringen Anzahl von Elementen ist die Berechnung nach wenigen Sekunden fertig, so dass man den Fortschritt der Simulation im Job-Manager nicht verfolgen kann.
- Details zur Berechnung werden eingeblendet, wenn man mit dem Cursor über dem Analyse-Job verharrt.

Als Ergebnis der Simulation erscheint in der aktuellen Programm-Version standardmäßig nur die Verschiebung (=Verformung) des Teils als Farbverlauf im Grafik-Fenster der Ergebnisse-Registerkarte.
Damit die **Vergleichsspannung (nach von Mises)** angezeigt wird, muss man unter ***MFL >***



Ergebniskonturen > Spannung > von Mises aktivieren. Die Mises-Spannung sollte dabei als Farbverlauf auf dem Bauteil angezeigt werden:

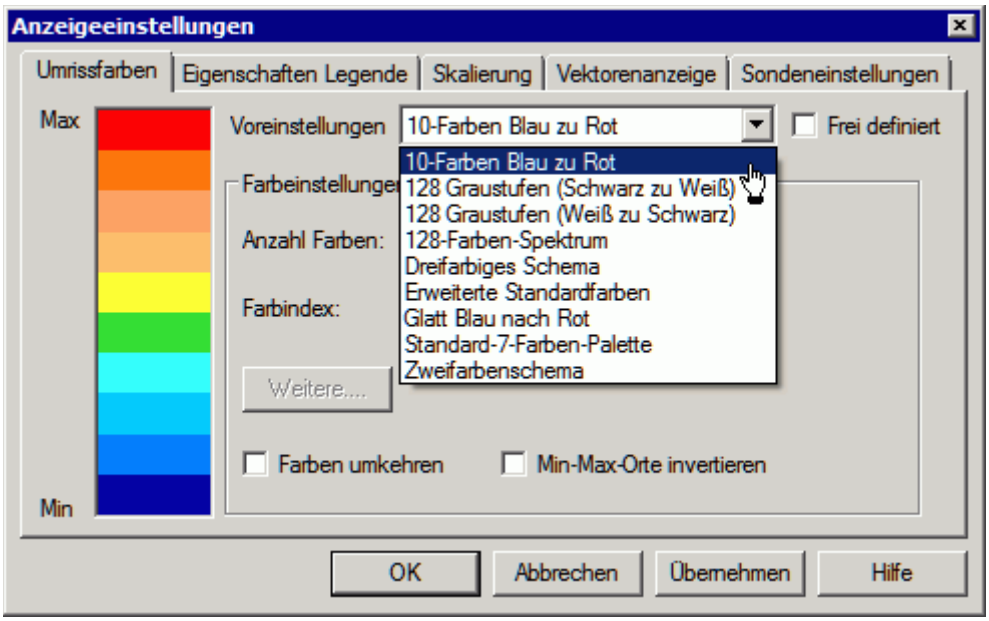


Achtung:

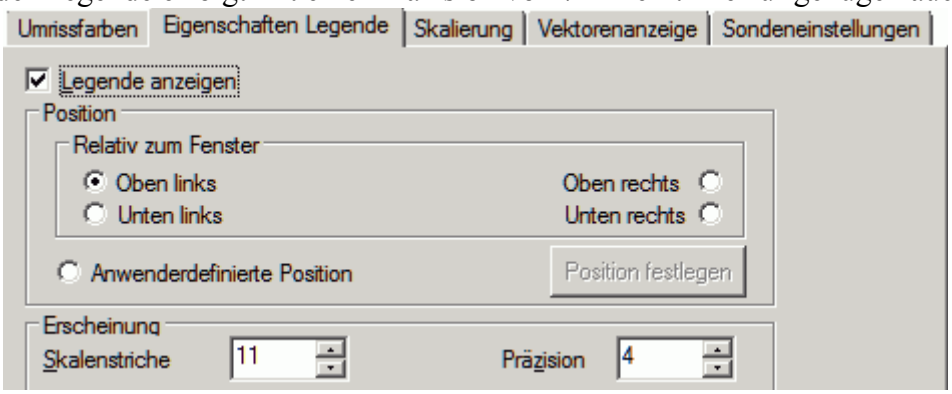
- Fehlt der Farbverlauf, so hat man ein Grafikkarten-Problem!
- Standardmäßig wird für die Darstellung der Ergebnisse in Form von Farbverläufen auf dem FEM-Netz eine Grafikkarte vorausgesetzt, welche OpenGL zur "Hardwarebeschleunigung" unterstützt. Ansonsten erscheint kein Farbverlauf auf dem Bauteil.
- Wird ein Intel Core Prozessor mit integrierter HD Graphic 3000/4000 benutzt, ist die Hardwarebeschleunigung zwar im Programms aktiviert, kann aber mangels Unterstützung durch die "echte" Hardware nicht ausgeführt werden (d.h., es werden keine farbigen Konturdarstellungen abgebildet).
- Die Grafik-Konfiguration erreicht man unter ***MFL > Extras > Anwendungsoptionen > Grafiken > Hardware***. Leider ist das Kästchen zum Deaktivieren der "OpenGL Hardware-Beschleunigung" grau (=nicht bedienbar).
- **Problem-Lösung**:
  Man muss *Autodesk Simulation Mechanical* einmalig als Administrator ausführen (rechte Maus auf Desktop-Icon > ***Kontextmenü > Als Administrator ausführen***), unabhängig davon, ob man als Nutzer bereits über Admin-Rechte verfügt! Dann kann man obige beschriebene OpenGL Hardware-Beschleunigung deaktivieren und die Anzeige der farbigen Ergebnis-Konturen funktioniert.

Die glattschattierte Darstellung der Farb-Kontur ist ungünstig für das Erkennen von Auffälligkeiten im Verlauf (z.B. infolge von Vernetzungsfehlern, fehlerhafter Belastung oder Einspannung):

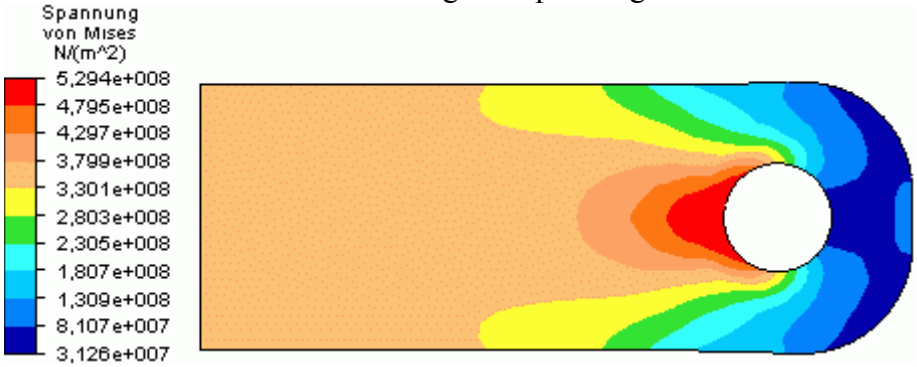
- Unter ***MFL > Ergebniskonturen > Einstellungen > Legenden-Eigensch. > Umrissfarben*** verbergen sich die Einstellungen zum Konfigurieren der Konturdarstellung:
- Voreingestellt ist der Farbverlauf "Glatt Blau nach Rot". Das ändern wir auf "10-Farben Blau zu Rot":



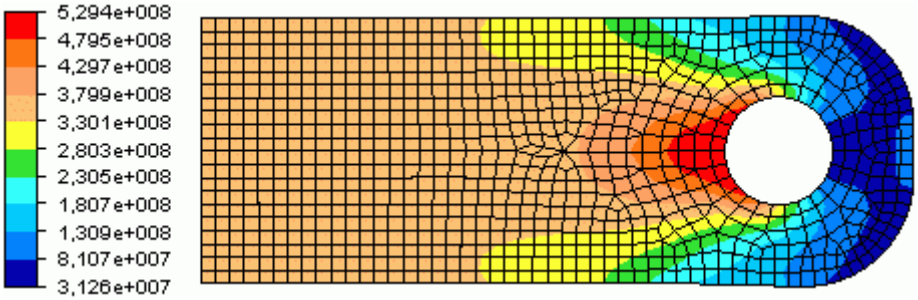
- Die Beschriftung der Legende erfolgt mit einer Präzision von 7 Ziffern. Hierfür genügen auch 4 Ziffern:



- Damit ergibt sich eine etwas übersichtliche Darstellung des Spannungsverlaufs:



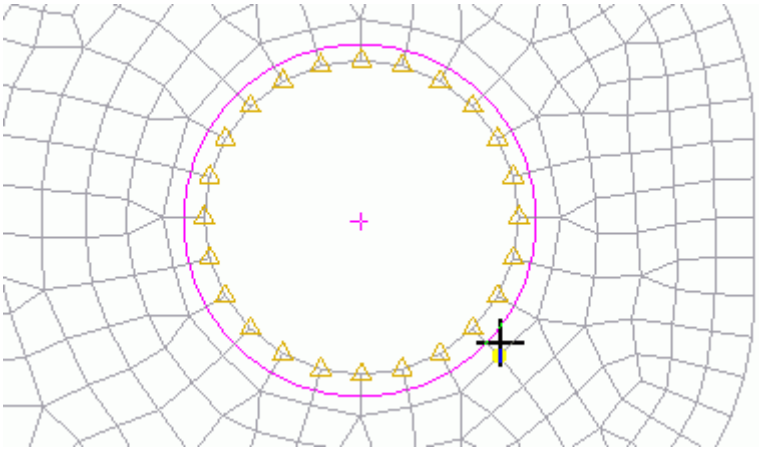
- Die Qualität der Vernetzung ist anscheinend schon recht gut. Ob eine feinere Vernetzung kritischer Stellen eine Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit ergibt, kann man nur durch Ausprobieren klären. Zuvor blenden wir das Netz in die Konturdarstellung ein (***MFL > Ansicht > Visueller Stil > Schattiert mit Netz***):



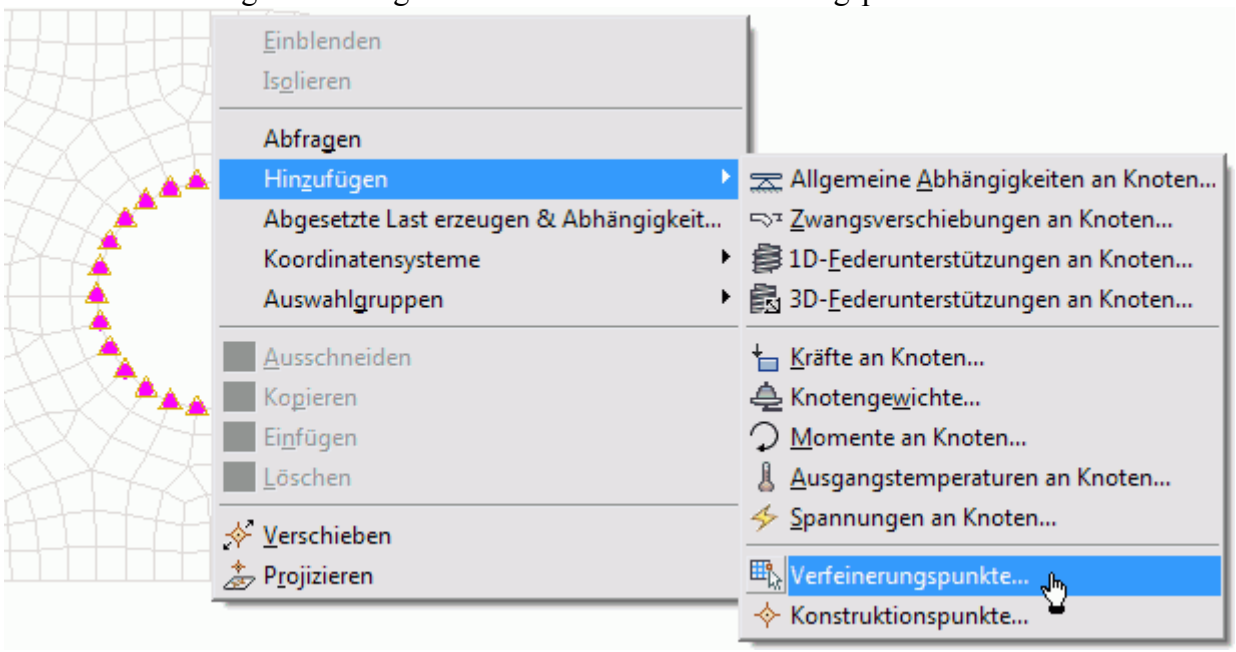
Netz-Verfeinerung

Die größten Spannungsgradienten treten direkt am Lochrand auf. Führt eine feinere Vernetzung des gesamten Lochrandes zu keiner wesentlichen Änderung von Minimum und Maximum der Spannung sowie der Spannungsverlaufs, so ist die Vernetzung wahrscheinlich in Ordnung:

- Um ein vorhandenes Netz an gewünschten Stellen zu verfeinern, definiert man sogenannte Verfeinerungspunkte. Für diese Punkte sollte man die Koordinaten vorhandener Knoten benutzen.
- Wir wollen die Vernetzung am Lochrand um den Faktor 2 verfeinern. Dafür wählen wir alle Knoten des Lochrandes als Verfeinerungspunkte.
- Dazu wechseln von der Anzeige der Ergebnisse in den FEM-Editor.
- Über ***MFL > Auswahl*** aktivieren wir **Form=Kreis** und **Auswählen=Knoten**. Dann muss man mit dem Cursor ungefähr den Mittelpunkt des Loches treffen, den Markierungskreis soweit vergrößern, bis alle Knoten des Randes umfasst sind und dann die Maustaste loslassen:



- Über das Kontextmenü fügen wir die gewählten Knoten als Verfeinerungspunkte hinzu:



- Das gleiche Bauteil wird im CAD-Tutorial (Belastungsanalyse) verwendet. Dort wurde die Netzgröße auf den Lochkanten auf ca. 10 µm verkleinert.

Im *Autodesk Simulation Mechanical* hat man zwei Parameter, um die Netzgröße in der Nähe der Verfeinerungspunkte zu beeinflussen:

1. **Effektiver Radius** legt den Kugelradius um die einzelnen Verfeinerungspunkte fest, in dem alle Elemente verfeinert werden sollen.
2. **Elementgröße** (absolut oder relativ):

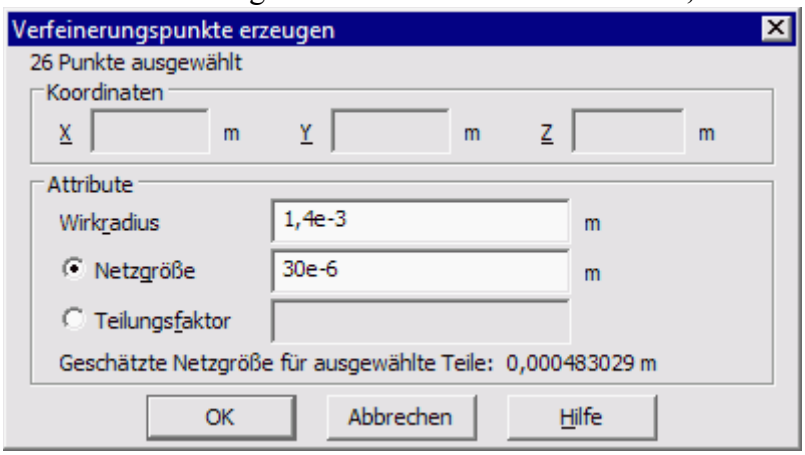
    - **Netzgröße** legt die Zielseitenlänge in Meter für Elemente innerhalb des Verfeinerungsbereichs fest. Außerhalb des Verfeinerungsbereichs geht das Netz in die normale Netzgröße über (*Netzgröße < durchschnittliche Netzgröße*).
    - **Teilerfaktor** bestimmt die Elementgröße innerhalb des Kugelradius relativ zur normalen Netzgröße.

Wir werden im Beispiel die Netzgröße als Absolutwert eingeben und uns an den Erfahrungen der CAD-Übung orientieren. Leider kann man als Einsteiger sehr viel Zeit mit der Konfiguration der Netzverfeinerung verbringen:

- Wird das Netz durch die Verfeinerung zu groß, so dauert die Erzeugung des Mittelflächen-Netzes "ewig". Das passiert bereits bei einem Oberflächennetz des Bauteilteils mit mehr als 50000 Elementen. Auch ein Abbruch des Vernetzungsvorgangs dauert dann "ewig".
- Wählt man den effektiven Radius zu klein, so erkennt man kaum Auswirkungen auf die Vernetzung des Lochrandes. Dieser Radius muss ausgehend von der Mittelebene die Oberfläche des eigentlichen Bauteils erreichen. Nur dann hat er Auswirkungen auf die Verfeinerung der Oberflächen und damit auf die Generierung des Mittelflächen-Netzes.
- Ein zu großer Radius erzeugt zu viele Elemente und führt zu "ewiger" Netzerzeugung.
- Den angegebenen Wert für Netzgröße findet man im erzeugten Mittelflächen-Netz nur tendenziell wieder. Die Elemente am Lochrand sind größer, was wahrscheinlich aus der Optimierung bei der Generierung des Mittelflächen-Netzes resultiert.

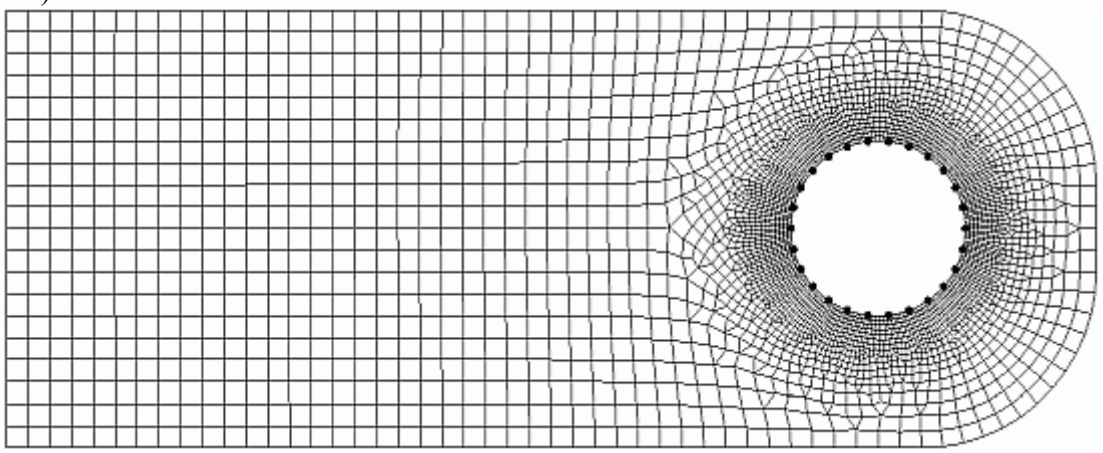
Um im Rahmen dieser Übung nicht unnötig Zeit zu verschwenden, benutzen wir folgende Verfeinerungsparameter, welche Resultat einer langwierigen iterativen Suche sind:

- Die Netzgröße um die Verfeinerungspunkte legen wir auf **30 µm** fest.
- Entsprechend der Bauteil-Dicke von 3 mm geben wir einen Wirkradius von **1,4 mm** an:



- Damit die Verfeinerungspunkte wirksam werden, muss man das Netz erneut erstellen (***MFL > Netz > 3D-Netz erstellen***). Leider gehen dabei sämtliche Lasten- und Abhängigkeitsgruppen verloren, weil die Fläche der Mittelebene neu erzeugt wird.
- Zum Glück sind die Zugkraft und die Fixierung des Lochrandes schnell wieder definiert.

Es entsteht das folgende verfeinerte Mittelflächen-Netz mit 3664 Elementen (generiert aus 37320 Elementen des Oberflächennetzes):



Vernetzungskorrektur:
Gibt es Probleme bei der Netzverfeinerung (z.B. nicht beherrschbare Elementanzahl, Fehlermeldungen bei der Vernetzung, ungünstige Verfeinerungsstruktur), so muss man sich einem brauchbarem Netz iterativ in folgenden Schritten nähern:

1. Löschen aller Verfeinerungspunkte über ***MFL > Netz > Verfeinerung > Knoten angeben > Alles löschen***.
2. Neue globale Vernetzung mit den Standard-Einstellungen über ***MFL > Netz > 3D-Netz erstellen***
3. Auswahl aller Knoten des Lochrandes und Hinzufügen als Verfeinerungspunkte mit geänderten Verfeinerungsparametern.

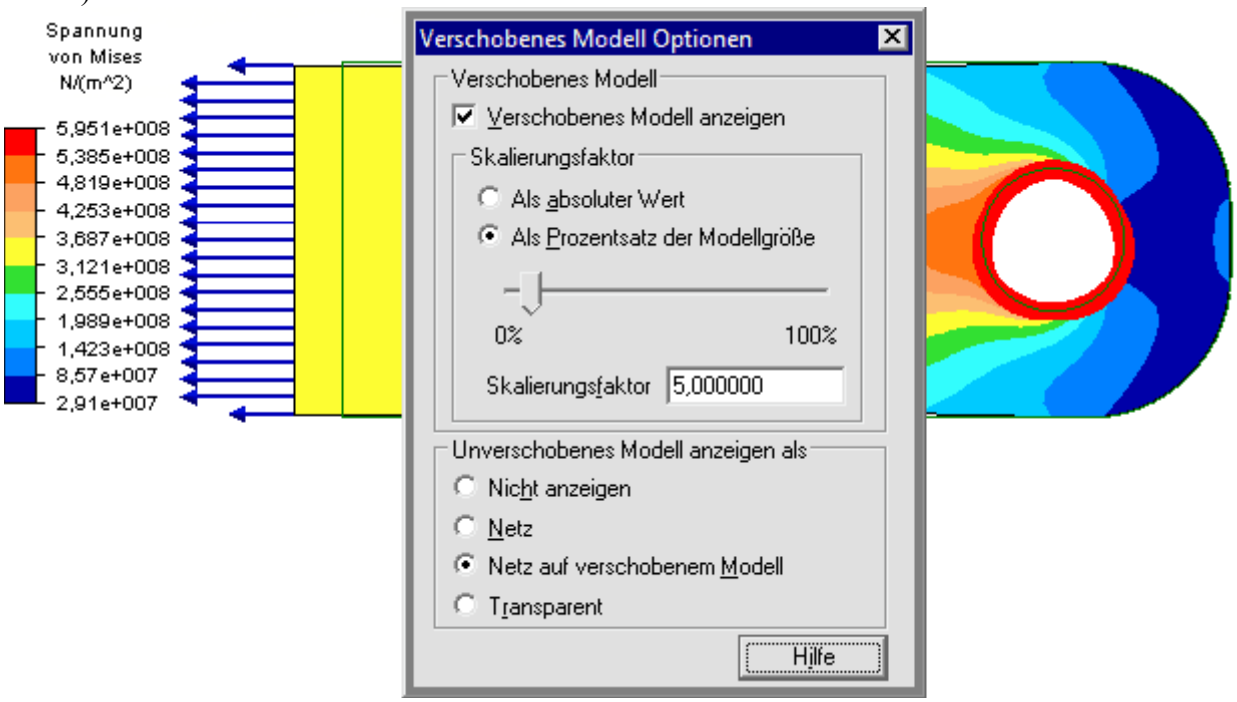
4. **3D-Netz erstellen** (nun mit der neuen Netzverfeinerung)

Ein erfolgreich verfeinertes Netz ergibt etwas veränderte Ergebnisse für die Mises-Spannung (Netz ausgeblendet mit ***MFL > Ansicht > Visueller Stil > Schattiert mit Elementen***):

- Das Spannungsmaximum vergrößerte sich um ca. 10%,
- Das Spannungsminimum verringerte sich um ca. 10%.

Nachdem wir mit der Vernetzung zufrieden sind, werden wir die Präsentation der Spannungsbelastung noch etwas verschönern:

- Einblenden der Kräfte und Fixierungen (***MFL > Ansicht > Sichtbarkeit > Lasten und Abhängigkeiten(EIN)***)
- Einblenden der unbelasteten Form (***MFL > Ergebniskonturen > Verschiebung > Optionen für Verschobene***):



- ***Hinweis:*** Die gesamte Zugkraft haben wir der linken Kante der Mittelfläche zugewiesen. Dort erfolgt dann jedoch automatisch eine Aufteilung auf alle Netzknoten dieser Kante. Je nach Abstand und Lage erhalten die einzelnen Knoten dabei unterschiedliche Kraftwerte. Deutlich wird das im Beispiel an den beiden Randknoten, welche jeweils nur die halbe Kraft im Vergleich zu den anderen Knoten erhalten. Nur dadurch ist eine konstante Linienlast entlang der Kante gewährleistet.

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Belastungsanalyse&oldid=16357“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Auflage-Reaktionen

Aus OptiYummy
↑

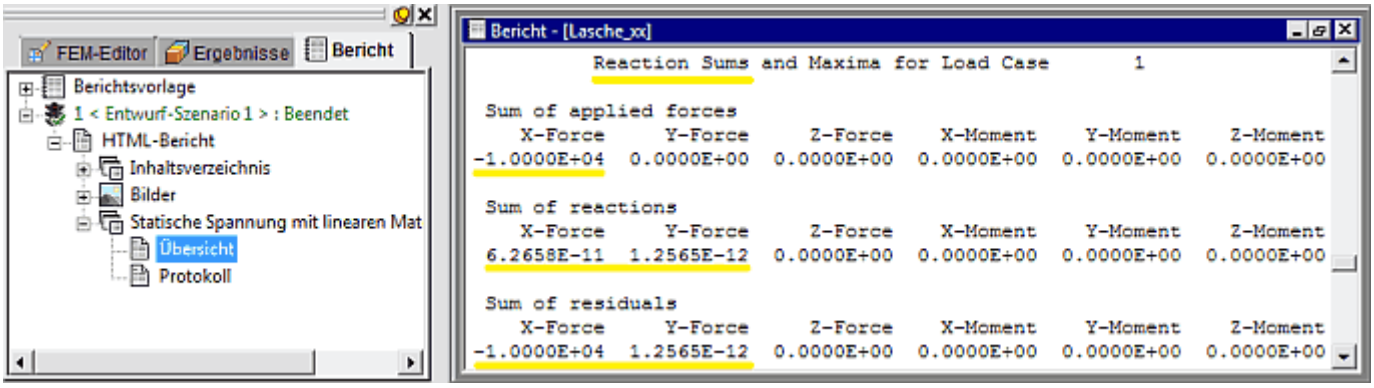
← →

Auflage-Reaktionen

Für die Dimensionierung der Lagerstellen sind die Lagerkräfte und Momente von Interesse. Außerdem bieten die Auflagereaktionen eine Möglichkeit der Modell-Validierung - für jeden mechanischen Freiheitsgrad i muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\Sigma \text{ Auflagereaktionen}_i + \Sigma \text{ Last}_i = 0$$

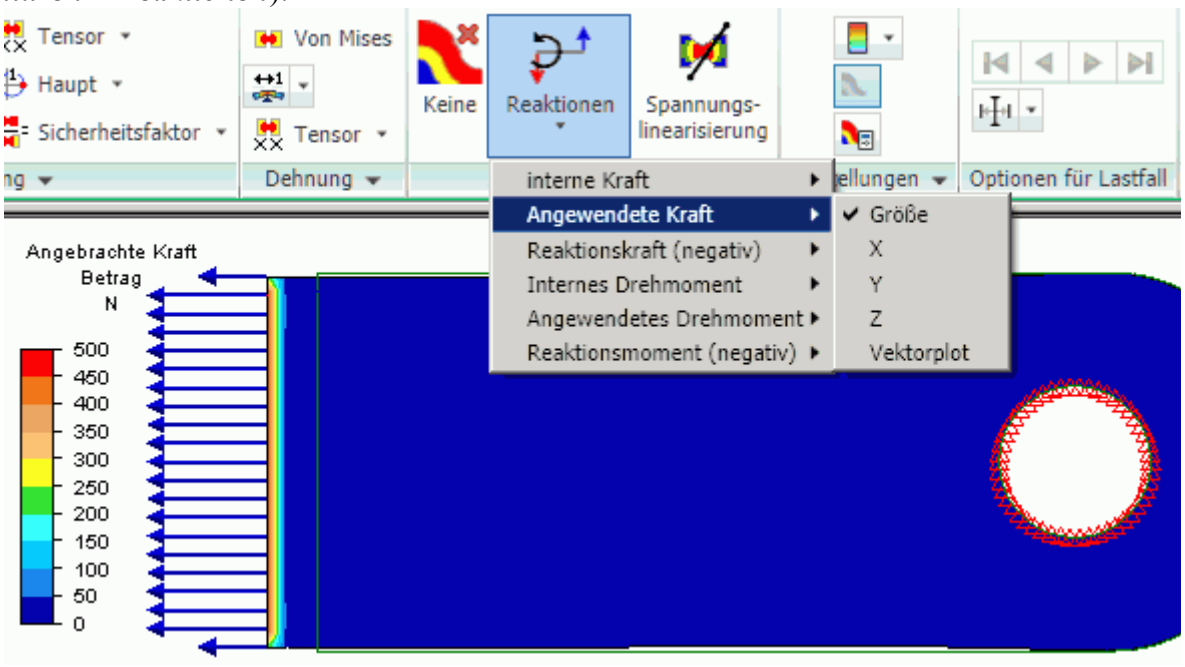
Die berechnete Summe der Auflagekräfte bzw. -momente versteckt sich im ***Bericht > Statische Spannung mit lin.Materialmodell > Übersicht*** ziemlich weit unten im Abschnitt für ***Reaction Sums ...***:



- die 6 Komponenten der aufgebrachten Belastung (*applied forces*) sollten exakt
- den 6 Komponenten der Lager-Reaktion entsprechen (*reactions*).
- die 6 Komponenten der aufsummierten Abweichung (residuals) sollten möglichst Null sein.

Im Beispiel erkennt man, dass infolge von Solver-Ungenauigkeiten eine geringe Lagerkraft in Y-Richtung berechnet wurde. (Die Überschriften für *reactions* und *residuals* sind vertauscht!)

Im grafischen Konturen-Plot besteht die Möglichkeit, Reaktionskräfte bzw. -momente auszuwählen (***MFL > Ergebniskonturen > Reaktionen***):



Leider ist die Aussagekraft der Darstellung relativ gering, weil sich die Kräfte/Momente jeweils auf die einzelnen Knoten beziehen, z.B.:

- ***Angewendete Kraft*** zeigt die auf jeden Knoten als Last aufgebrachte Kraft an.
- Die Gesamt-Kraft von 10000 N wurde entsprechend ihrer Position auf alle Knoten der Kante aufgeteilt.
- Von den insgesamt 21 gleichmäßig verteilten Knoten erhielten 19 Knoten eine Kraft von 500 N und die beiden Randknoten jeweils 250 N.
- Bei ungleichen Abständen zwischen den Knoten würde man die Kraftaufteilung nicht mehr sofort überblicken!

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Auflage-Reaktionen&oldid=11733“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Vergleichsspannung

Aus OptiYummy
↑

← →

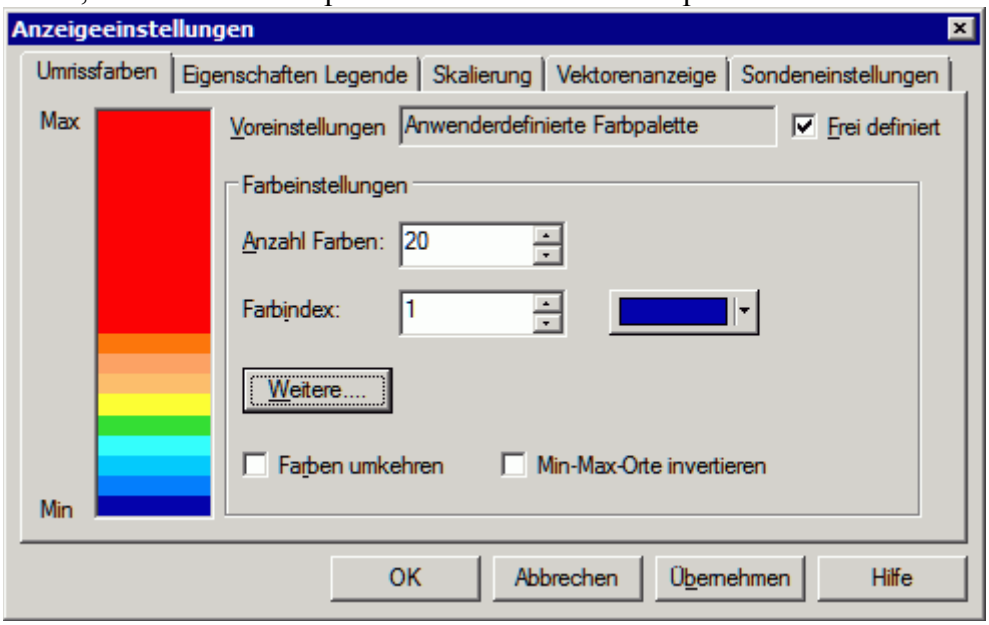
Vergleichsspannung

Nach der Simulation (Analyse) haben wir die berechnete mechanische Mises-Vergleichsspannung farblich codiert auf der Oberfläche des Bauteils als "Kontur-Darstellung" anzeigen lassen. Die Farbskala ist dabei automatisch zwischen dem Minimal- und Maximal-Wert der Spannung linear skaliert.

Für das Bauteil wird trotz des Flächen-Modells der dreidimensionale Spannungszustand berechnet, weil wir Schalen-Elemente verwenden. Der Spannungszustand an einer beliebigen Position ist durch drei **Normalspannungen** (Spannung XX, Spannung YY und Spannung ZZ) sowie drei **Schubspannungen** (Spannung XY, Spannung YZ und Spannung XZ) definiert. Da sich trotz Element-Dehnung bzw. Element-Verbiegung die Dicke der Flächen-Elemente nicht ändern kann, entstehen keine Spannungen mit Z-Komponente. Das kann man überprüfen, indem man alternativ jeweils eine dieser Spannungskomponenten als Kontur-Darstellung aktiviert (***MFL > Ergebniskonturen > Spannung > Tensor > Komponente***).

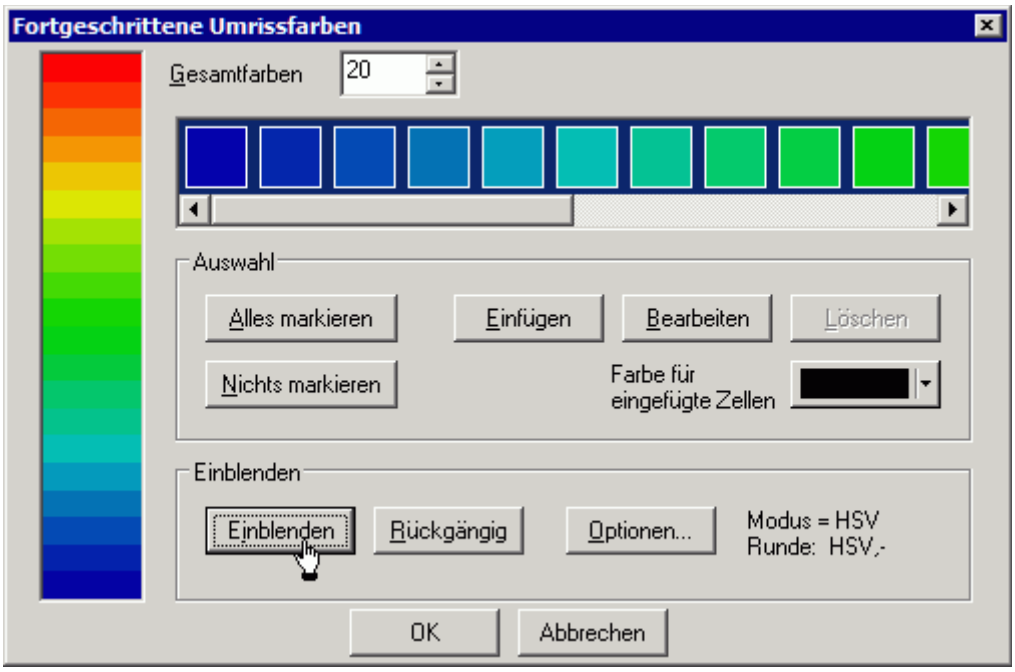
Die **Mises-Vergleichsspannung** liefert aber meist schon hinreichende Aussagen in Bezug auf die Bauteilbelastung:

- Wir hatten bereits eine 10-stufige Farbstaffelung von Blau zu Rot eingestellt.
- Man kann diese Farbskala frei definieren, z.B. die Anzahl der Farben erhöhen. Aber dies ist auf den ersten Blick sehr umständlich, weil sich die Farbpalette nicht automatisch anpasst:

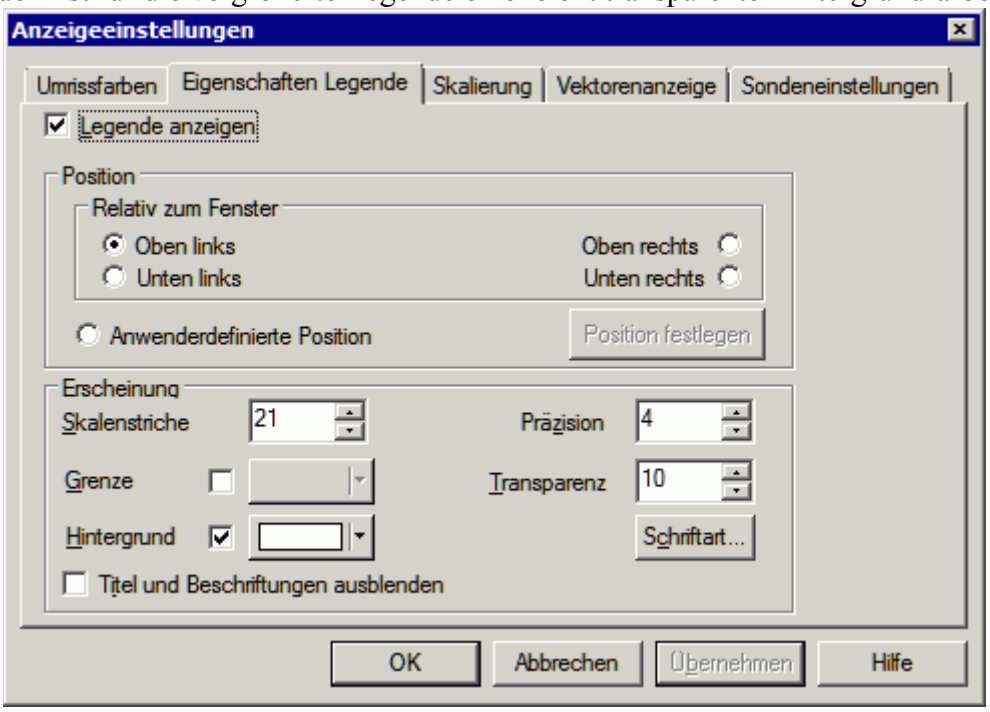


Die automatische Anpassung der Farbskala ist jedoch sehr einfach:

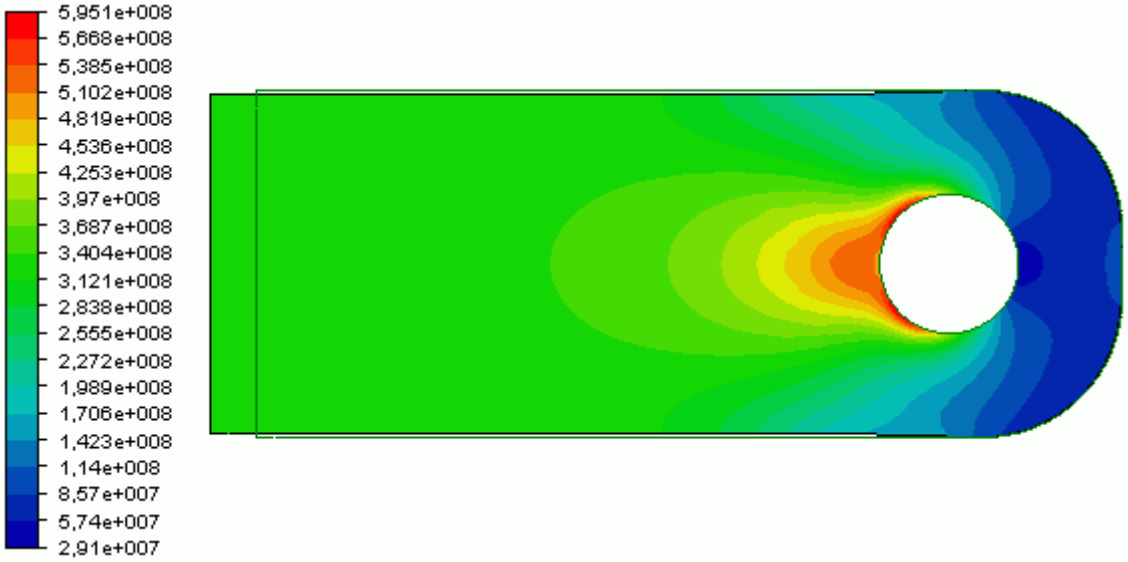
- Man sollte darauf achten, dass der **Farbindex der obersten Stufe=Rot** ist. Dies ist im Beispiel gegeben.
- Es ist günstig, den **Farbindex der untersten Stufe=Violett** zu setzen. Im Beispiel wurde die Vorgabefarbe **Blau** benutzt, was ein etwas ungünstigeres Farbspektrum ergibt.
- Der Button **Weitere...** führt zu einer detaillierten Farbkonfiguration für das Farbspektrum. Dort muss man zuerst ***Alles markieren***, dann ***Einblenden*** aktivieren:



- In der **Registerkarte Eigenschaften Legende** sollte man die Zahl der Skalenstriche an die Anzahl der Farben anpassen. Außerdem ist für die vergrößerte Legende eine leicht transparente Hintergrundfarbe sinnvoll:

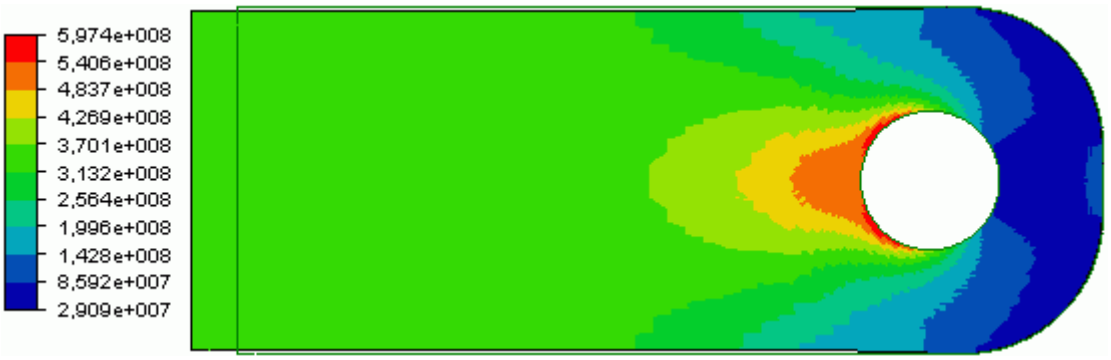


- Nach Ausblenden von *Lasten & Abhängigkeiten* ergibt sich folgende Darstellung für die Mises-Spannung:



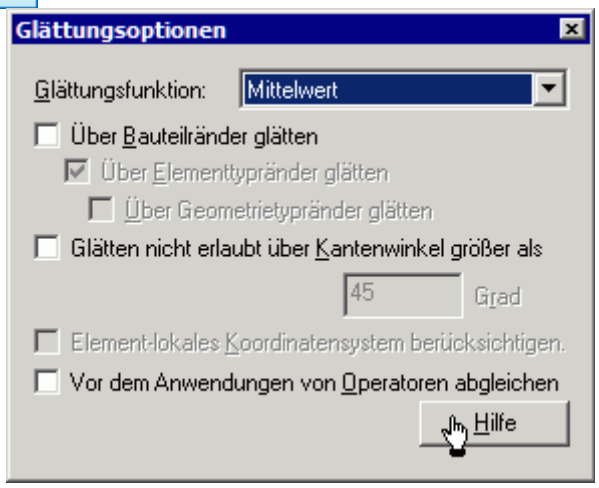
Hinweis: Wenn man die Anzahl der Farbstufen verringern möchte, geht dies ähnlich einfach. Man muss dann zuvor für den oberen Farbindex (z.B. Farbindex 10) manuell die Farbe Rot zuweisen. Erst dann kann "Weitere ... Einblenden" den gewünschten Farbverlauf zwischen z.B. Violett und Rot generieren. Für den Spezialfall von 10 Stufen sollte man jedoch wieder die vordefinierte "10-Farben Blau zu Rot"-Palette verwenden!

- Da wir zu Beginn bereits die glatte Kontur gegen Farbstufen ausgetauscht hatten, wurde uns nicht bewusst, dass wir trotzdem eine geglättete Darstellung sehen:
- Verantwortlich ist die Option ***MFL > Ergebniskonturen > Einstellungen >*** Abgleichungsergebnisse, welche standardmäßig aktiviert ist. Schaltet man dieses Glätten aus, verändert sich nicht nur Kontur-Darstellung, sondern es ändern sich auch die ermittelten Minimal-/Maximalwerte (im Folgenden wieder mit 10-stufiger Skale):



Im Beispiel ändert sich der angezeigte Maximalwert infolge der sehr feinen Vernetzung nur im Promillebereich. Bei einem gröberen Netz kann die Änderung aber auch einige Prozent betragen. Deshalb sollte man unbedingt beachten, wie aus den primären Rohdaten der Element-Knoten die sekundären Wert-Verläufe in den Elementen berechnet werden:

- Nach erneutem Aktivieren von **Ergebnisse glätten** betrachten wir die unterschiedlichen Varianten der Glättung in den Glättungsoptionen:



In der Hilfe-Datei werden die Grundprinzipien der Modell- und Datenverarbeitung ausführlich beschrieben. Man sollte deshalb öfter einen Blick in die Hilfe werfen:

- Benachbarte Elemente besitzen gemeinsame Knoten (im allgemeinen Eck-Knoten, eventuell auch Mittel-Knoten auf den Element-Seiten).
- Für knotenbasierte Ergebnisse (Verschiebung, Temperatur, Geschwindigkeit usw.), gibt es nur einen Wert an jedem Knoten, sodass die Option "*Ergebnisse glätten*" keine Auswirkungen hat.
- Für elementbasierte Ergebnisse (z. B. Spannung) werden die Werte an den gemeinsamen Knoten für jedes Element unabhängig berechnet. Das bedeutet, ein Knoten besitzt so viele (unterschiedliche) Werte, wie er gemeinsamer Knoten unterschiedlicher Elemente ist.
- Der interpolierte Verlauf der Werte über ein Element wird aus den zum Element gehörenden Knotenwerten berechnet. Ohne Glättung kann es also zu Sprüngen der Wertverläufe an den Elementgrenzen kommen.
- Als Resultat einer Glättung steht für alle an einen Knoten grenzenden Elemente ein gemeinsamer Wert zur Verfügung:

1. **Mittelwert** - ist die Standard-Methode. Aus allen Werten eines Knoten wird der Mittelwert gebildet. Für kontinuierliche Verläufe widerspiegeln die resultierenden Werte den tatsächlichen Verlauf am besten.
2. **Maximum** - damit liegt man bei vorzeichenlosen Belastungswerten (z.B. Mises) oder positiven Belastungswerten auf der sicheren Seite. Von allen Werten eines Knoten wird der größte Wert benutzt.
3. **Maximale Größe** - wirkt ähnlich wie "Maximum", berücksichtigt aber durch Betragsbildung auch negative Extremwerte.
4. **Minimum** - damit liegt man bei negativen Belastungswerten oder Sicherheitsfaktoren auf der sicheren Seite. Von allen Werten eines Knoten wird der kleinste Wert benutzt.
5. **Bereich** - es wird die Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert gebildet. Damit kann man die Bereiche im Netz mit den größten Diskontinuitäten identifizieren. Existieren an diesen Stellen in der Realität kontinuierliche Verläufe, so ist dies ein Zeichen für eventuell erforderliche Netzverfeinerung!
6. **Summe** - damit kann man sicher auch die Qualität des Netzes überprüfen. Es ist nur nicht klar, unter welchen Aspekt? (Vielleicht hat jemand eine Idee!)

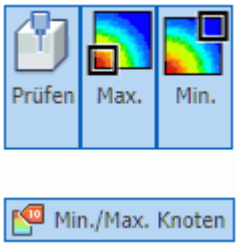
Die einzelnen Möglichkeiten sollte man mal ausprobieren, um ein Gefühl für die Wirkung der einzelnen Glättungsmethoden zu erhalten.

Wirkung der weiteren Glättungsoptionen:

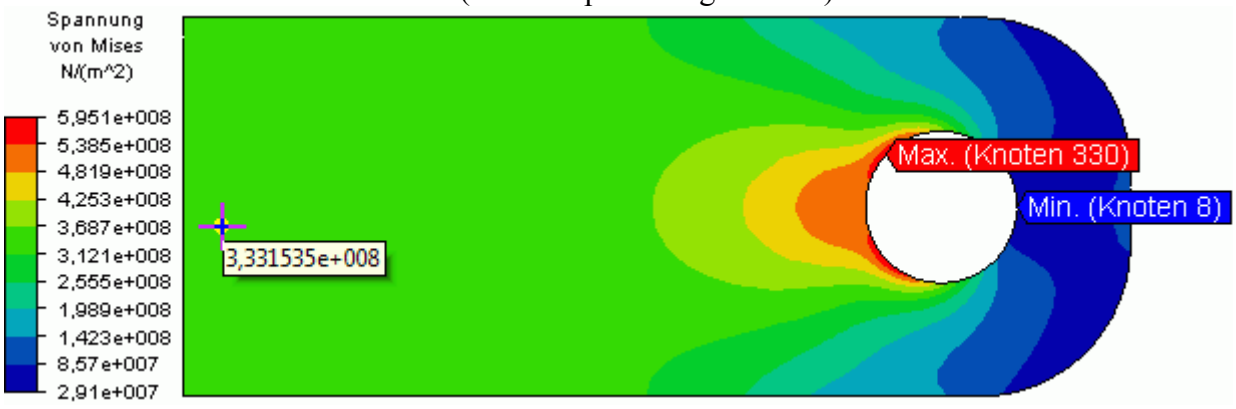
1. **Über Ränder glätten** - sollte man "nie" aktivieren, weil damit die real vorhandenen Spannungssprünge an Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialien und Geometrien retuschiert werden.
2. **Über Kantenwinkel glätten** - hat nur Bedeutung bei räumlich geknickten 2D-Netzen (z.B. gefaltetes Blech ab einem bestimmten Knickwinkel).
3. **Vor dem Anwenden von Operatoren abgleichen** - sollte man nicht aktivieren, da die Gefahr "sinnloser" Ergebnisse besteht:

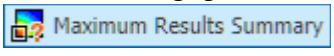
    - Standardmäßig werden die elementbezogenen Operatoren (z.B. Mises-Spannung berechnen) mit den elementspezifischen Knotenwerten berechnet. Erst die Ergebnisse (z.B. unterschiedliche Mises-Spannung für die Knoten) werden dann der Glättung unterzogen.
    - Glättet man zuerst die Primär-Werte an den Knoten und wendet die Operatoren erst auf die geglätteten Werte an, können sich die Ergebnisse stark unterscheiden. Laut Hilfe-Datei sollten sich die Ergebnisse bei hoher Netzqualität nicht unterscheiden. Im Übungsbeispiel sind die Unterschiede extrem. Aktiviert man die Option "vorher glätten", entstehen "eigenwillige" Ergebnisse für die Mises-Spannung.

Die Kontur-Darstellung gibt einen sehr guten qualitativen Überblick auf die berechneten Ergebnisse. Häufig benötigt man jedoch die Werte an konkreten Punkten. Diese erhält man unter ***MFL > Ergebnisse abfragen > Sonden***:

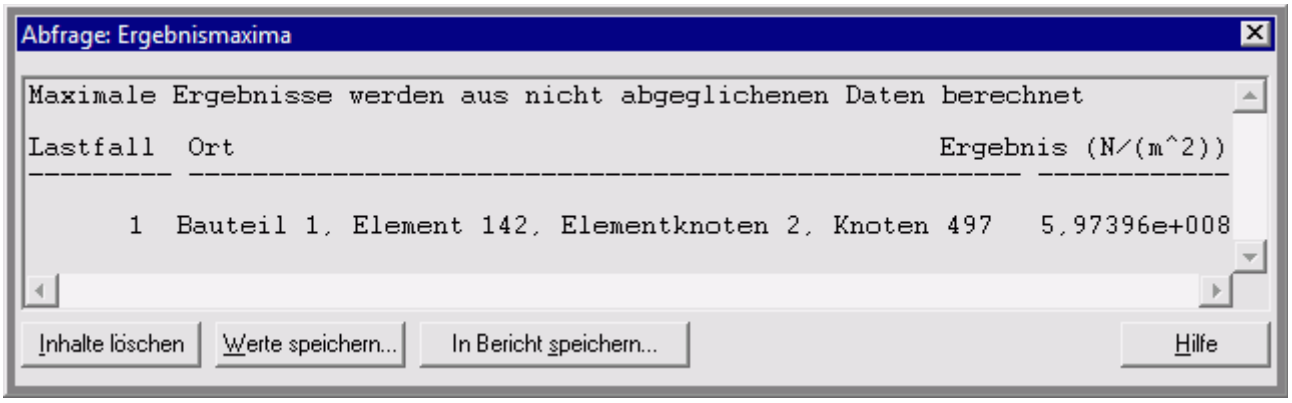


- **Maximum** einblenden
- **Minimum** einblenden
- **Knoten-Nr. Minimum/Maximum** einblenden
- **Prüfen** des Wertes an der Cursor-Position (wird temporär eingeblendet):

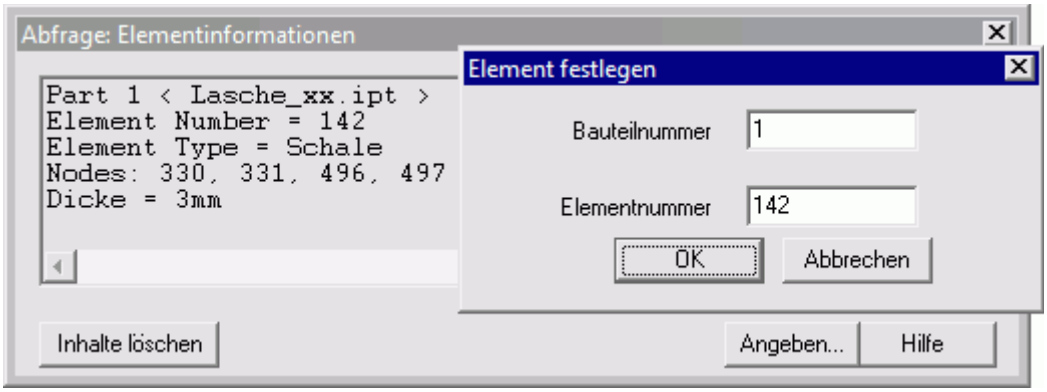


In der auf Min/Max-skalierten Legende kann man die geglätteten Extremwerte ablesen. Den tatsächlich berechneten maximalen Knotenwert erhält man unter 

:


Abfrage: Ergebnismaxima
Maximale Ergebnisse werden aus nicht abgeglichenen Daten berechnet
Lastfall Ort Ergebnis (N/(m^2))
1 Bauteil 1, Element 142, Elementknoten 2, Knoten 497 5,97396e+008
Inhalte löschen
Werte speichern...
In Bericht speichern...
Hilfe

- Es handelt sich um den Knoten 497 und nicht um Knoten 330 (wie auf der Kontur eingeblendet)
- Öffnet man mittels Elementinformationen das Element 142 (**Angeben** der Elementnummer), so erkennt man den Knoten 330 ebenfalls als Knoten des Elements:



- Der geglättete Wert von Knoten 330 ist zufällig größer als der geglättete Wert von Knoten 497.

Interpretation der Spannungsbelastung am Loch:

- Da der Lochrand fixiert wurde, tritt die maximale Belastung an der Lochhälfte in Zugrichtung auf. Dort "hängt" die Lasche praktisch dran.
- Infolge der Nachgiebigkeit des Materials ist die Belastung auf der anderen Seite des Loches am geringsten. Das Material "fließt" praktisch um den Bolzen herum.
- Ob die berechneten Extremwerte stimmen, ist schwer zu entscheiden. Insbesondere die Maximalwerte am Lochrand sind mit Skepsis zu betrachten, da sie vor allem aus den Idealisierungen der Befestigungsstelle resultieren.
- Es fehlt im Modell die Dickenänderung infolge der Streckung. Diese Dickenänderung würde an einem durchgängig fixierten Lochrand an den Lochkanten zu starken Schubspannungen führen (Abschälkräfte an den Lochkanten). Diese Form der Kantenbelastung wird in unserem Modell nicht berücksichtigt.
- Eine Besonderheit ist die leichte Spannungserhöhung am Rand des Bogens hinter dem Minimum. Erklärbar ist dies durch die Spannungen quer zur Zugrichtung, welche infolge das "Fließen" des Materials um den Bolzen entstehen.

←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Vergleichsspannung&oldid=15231“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Deformation

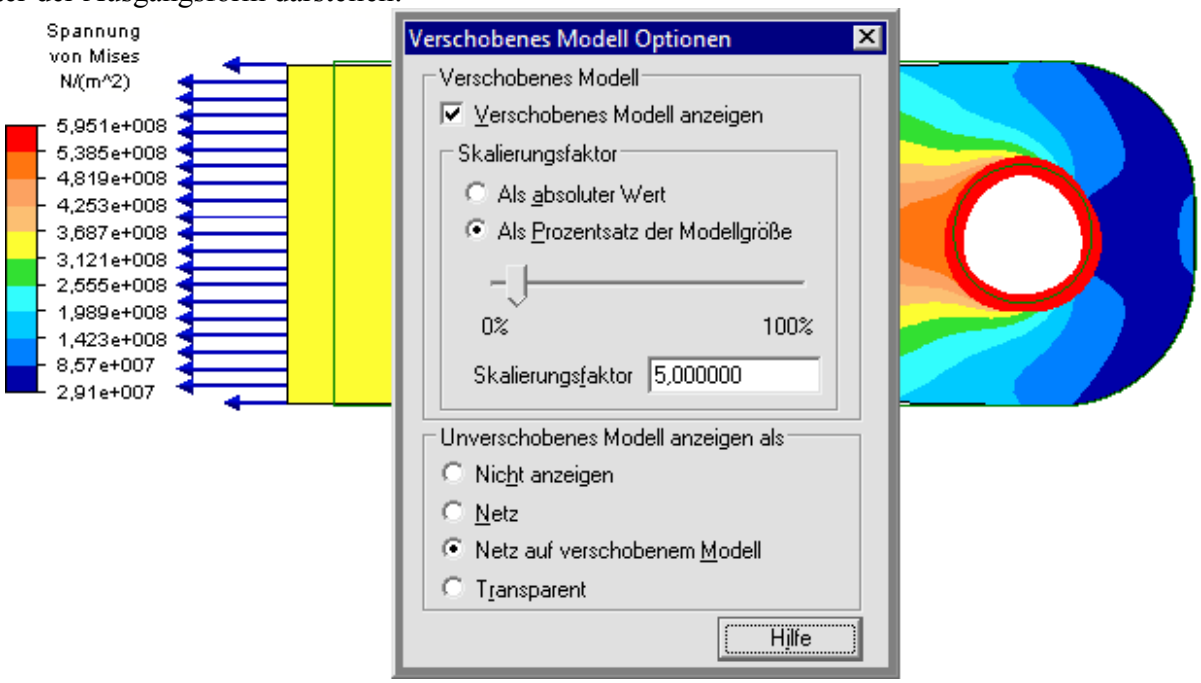
Aus OptiYummy
↑

← →

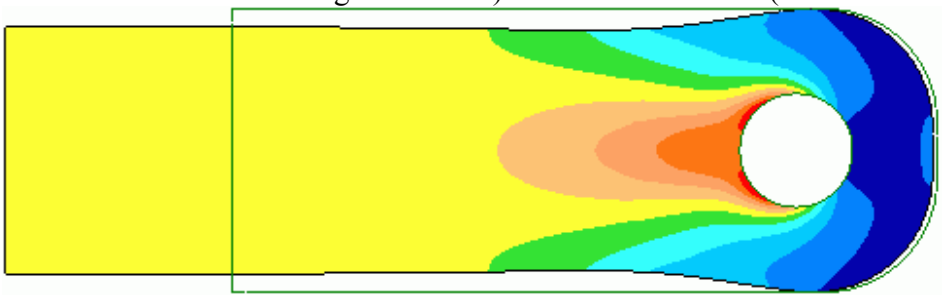
Deformation

Aus der aufgebrachten Last resultiert eine Deformation des Bauteils infolge der Einspannungen an den Lagerstellen:

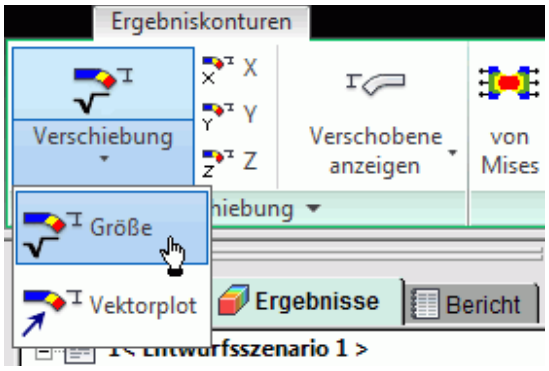
- Diese Verformung wird bereits standardmäßig dargestellt. Bezogen auf die maximale Abmessung des Bauteils wird dabei der Punkt mit der größten Verschiebung um 5% versetzt abgebildet. Die anderen Punkte werden dazu im richtigen Verhältnis verschoben.
- Damit man die Verformung visuell qualitativ beurteilen kann, sollte man das verformte Teil im Vergleich zum Drahtgitter der Ausgangsform darstellen:



- Größere Prozentsätze mit extrem überzeichneter Darstellung sind im Spezialfall durchaus sinnvoll, um kleinere Verformungen (z.B. die seitliche Einschnürung der Lasche) erkennen zu können (hier Skalierungsfaktor 30%):

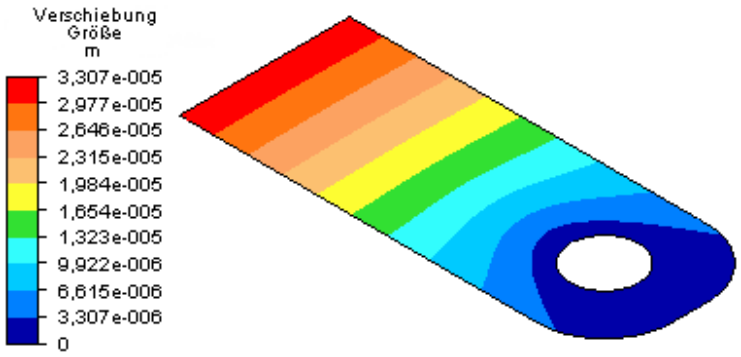


- Die Skalierung in Bezug auf die Modellgröße besitzt den Nachteil, dass die Verformung unabhängig von der realen Größe in der grafischen Darstellung immer gleich erscheint.
- Einen Skalierungsfaktor in Bezug auf den absoluten Wert der Verschiebungen sollte man deshalb benutzen, wenn man unterschiedliche Lastfälle für ein Bauteil vergleichen möchte.

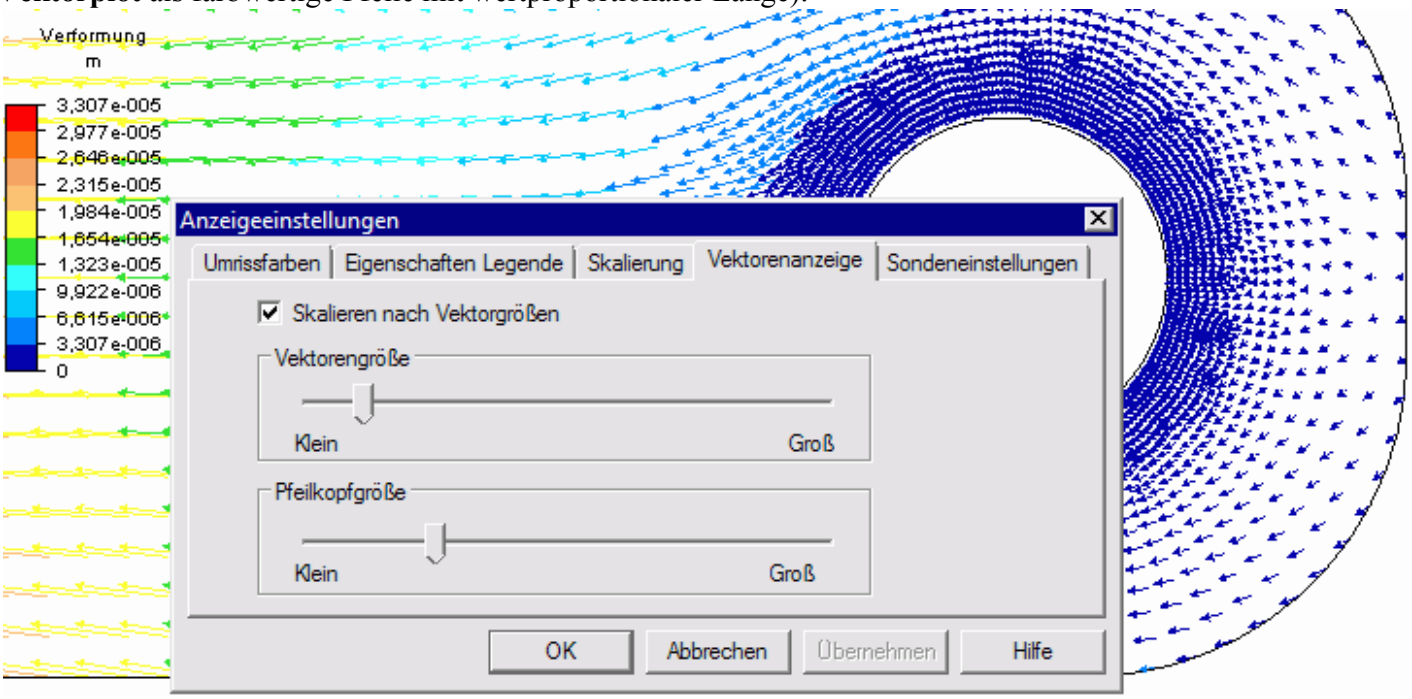


Jedem Knoten des Netzes ist nach der Modell-Berechnung ein Verschiebungsvektor zugeordnet:

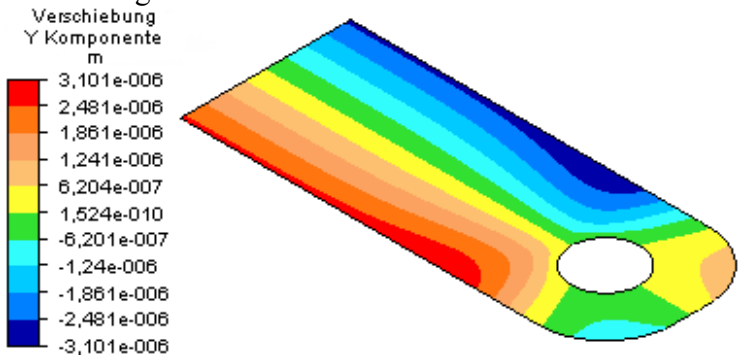
- Die Darstellung der Verschiebung auf der Kontur ist unabhängig von der Option "Verschobene anzeigen", welche die Form der Kontur entsprechend verzerrt. Für die folgenden Bilder wurde diese Kontur-Verformung abgeschaltet:



- Die drei Komponenten der Verschiebung (X,Y,Z) können separat für die farbige Kontur-Darstellung ausgewählt werden.
- Man kann auch die Gesamt-**Verschiebung** auf der Kontur abbilden (wie oben: **Größe** als Farbwert oder **Vektorplot** als farbwertige Pfeile mit wertproportionaler Länge):



- Die Konfiguration der **Vektorenanzeige** erfolgt in einer Registerkarte der Anzeigeeinstellungen (***MFL > Ergebniskonturen > Einstellungen > Eigenschaften der Legende***).
- Für jeden Knoten wird exakt nur ein Verschiebungsvektor berechnet. Eine Glättung der Werte ist also nicht nötig. Deshalb ist in diesem Fall die Funktion "Ergebnisse glätten" inaktiviert.
- Die Deformation erfolgt im Beispiel überwiegend in X-Richtung. Infolge der Einschnürung des Teils gibt es auch geringe Verschiebungen in Y-Richtung:



- ***Hinweis:*** Die **Verschiebung** (Verformung) muss man unterscheiden von der **Dehnung**. Die Dehnung ist eine relative Größe [m/m] und für lineare Modell proportional zur zugehörigen Belastungsrichtung.

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Deformation&oldid=15232“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Beanspruchung

Aus OptiYummy
↑

← →

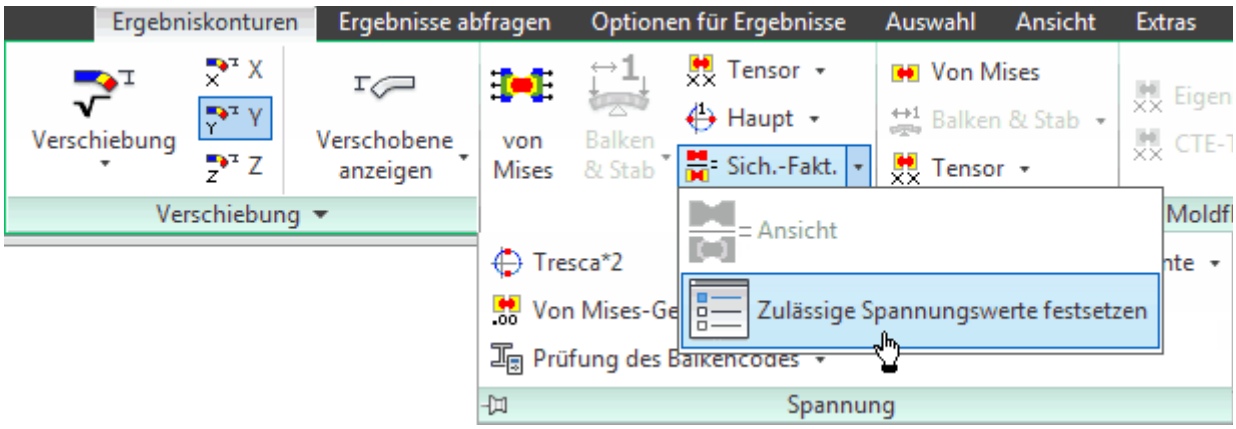
Beanspruchung (Sicherheitsfaktor)

Der **Sicherheitsfaktor** (gegen Fließen) für verformbare Materialien wird definiert als das Verhältnis der Streckgrenze des Materials zur maximal auftretenden Belastung:

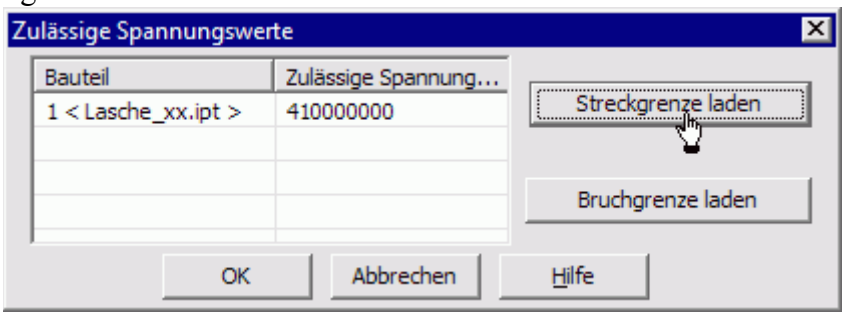
$$S_F = R_e / \sigma_{max}$$

Ein Sicherheitsfaktor kleiner 1 weist normalerweise auf einen Konstruktionsfehler hin, der mit ziemlicher Sicherheit zu einer Zerstörung des Teils führt:

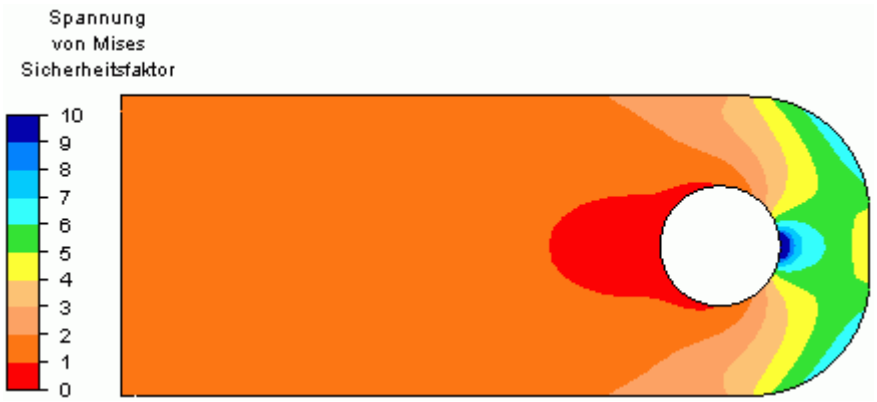
- Bevor man den **Sicherheitsfaktor** als Farbkontur anzeigen lässt, muss man die **zulässige Spannung festlegen**:



- Die zulässigen Spannungswerte für das Bauteil sollten aus den Materialdaten übernommen werden:

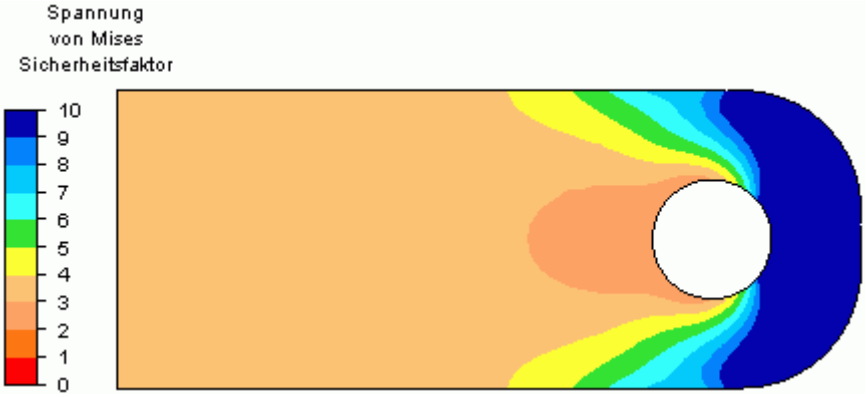


- Standardmäßig ist in Spalte "Zulässige Spannung" bereits korrekt der Wert der **Streckspannung** (hier **410 MPa**) aus den Materialdaten (hier **Stahl-C35**) eingetragen.
- Über die Schaltflächen **Streckgrenze laden** bzw. **Bruchgrenze laden** kann man diese Werte aus den Materialdaten laden (Bruchgrenze = Zugfestigkeit - hier **640 MPa**).
- Man kann den Wert der zulässigen Spannung aber auch manuell direkt in der Tabellenspalte editieren.
- Damit die **Ansicht** des Sicherheitsfaktors aktivierbar ist, muss in der **MFL** auch die Darstellung der **von Mises**-Spannung aktiviert sein:

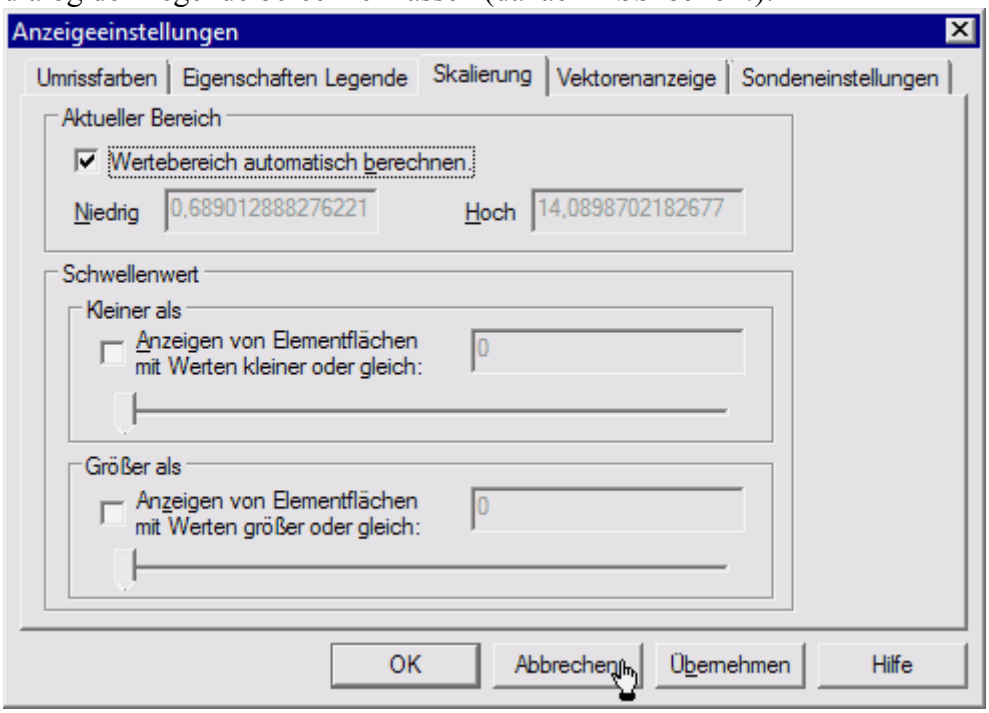


- Anstatt der automatisch ermittelten Extremwerte wurden für die Farbskala manuell Grenzwerte vorgegeben, welche eine 1-er Stufung des Sicherheitsfaktors ergeben.
- Die roten Bereiche des Teils besitzen einen Sicherheitsfaktor < 1 und werden mit Sicherheit zerstört.

Frage 1: Wie groß ist die maximal zulässige Zugkraft, damit der **Sicherheitsfaktor 2** bei Fixierung des Lochrandes an keiner Stelle des Modells unterschritten wird?



- Da es sich um ein Modell mit linearem Materialverhalten handelt, kann man die zulässige Kraft durch eine einfache Proportionalitätsformel berechnen. Die berechnete Kraft ist für die abschließende Analyserechnung in diesem Modell zu verwenden.
- Werden die benötigten Extremwerte nicht als Grenzen der Farbskala verwendet, so kann man sich diese über den Eigenschaftsdialog der Legende berechnen lassen (danach **Abbrechen!**):



←→

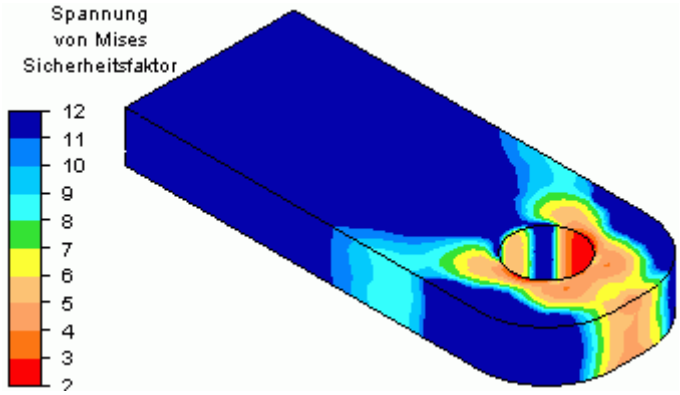
Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Beanspruchung&oldid=16288“

-

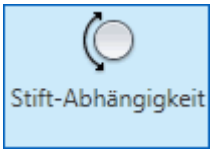
Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - Spielpassung

Aus OptiYummy
↑

←→



Spielpassung auf biegesteifem Bolzen



Im Folgenden wird die vom *Autodesk Simulation Mechanical* bereitgestellte Funktion der **Stift-Abhängigkeit** zur Nachbildung einer Spielpassung benutzt. Damit soll eine realistischere Befestigung der Lasche am Bolzen im Modell nachgebildet werden.

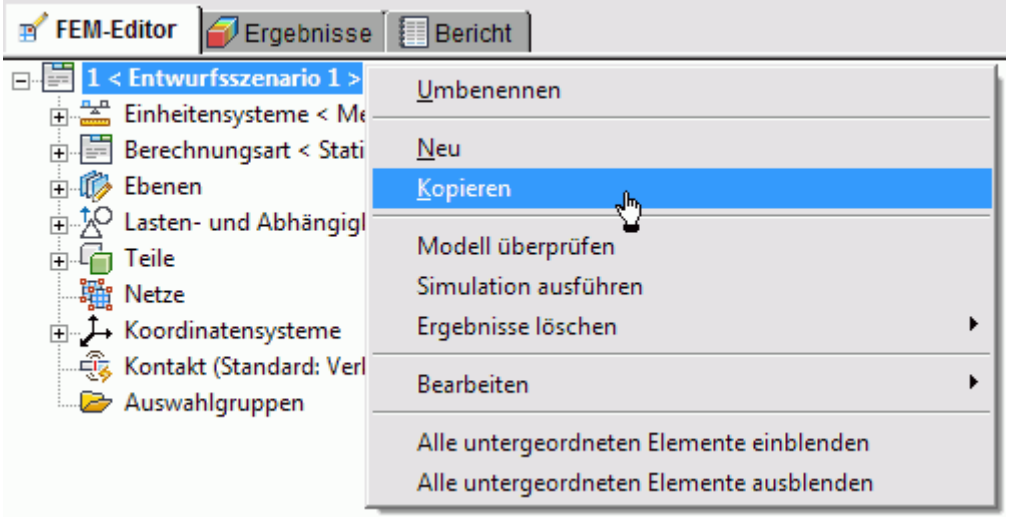
Inhaltsverzeichnis

- 1 Entwurfsszenarien
- 2 3D-Volumennetz
- 3 Kantenverfeinerung
- 4 Passung
- 5 Spiel-Passung

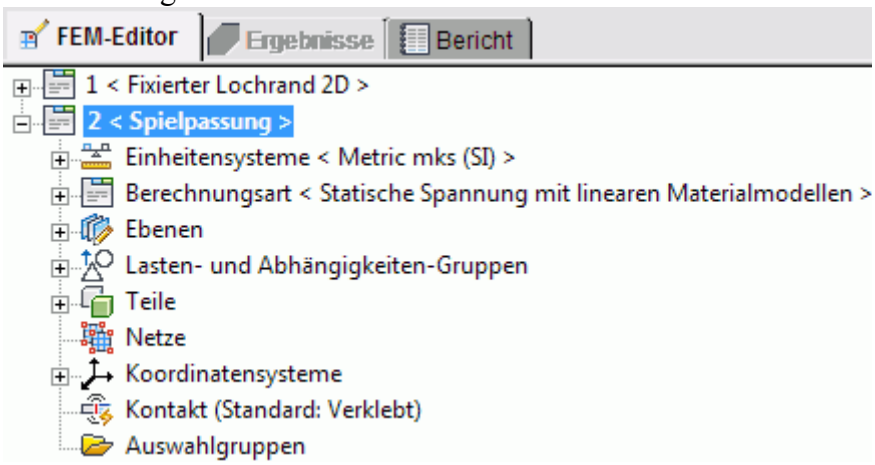
Entwurfsszenarien

Wir konfigurieren ein weiteres Entwurfsszenarium **Spielpassung** auf Grundlage des bisherigen Entwurfsszenariums **Fixierter Lochrand 2D**, um die unterschiedliche Belastung der Lasche einfach vergleichen zu können:

- Entwurfsszenarien kann man in der Browser-Ansicht mittels ***Kontextmenü > Kopieren***:

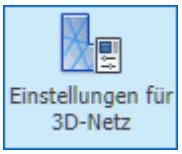


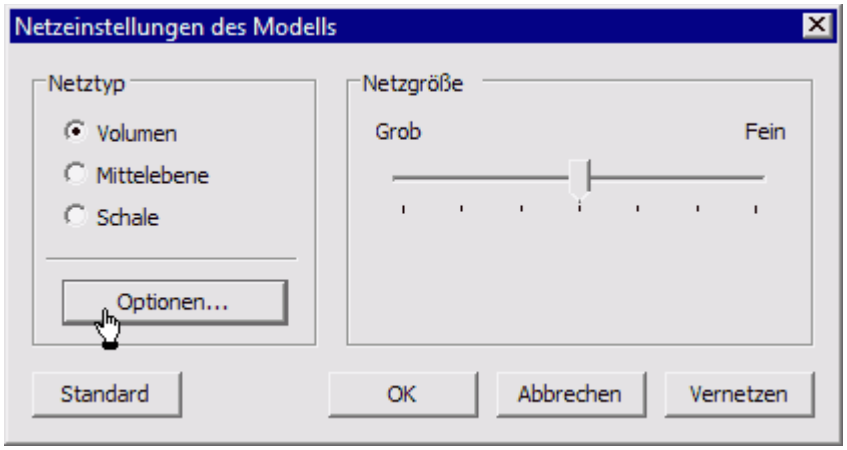
- Anschließend vergeben wir durch ***Umbenennen*** obige Bezeichnungen für beide Szenarien. Dabei kann immer nur das jeweils aktive Szenarium geöffnet und bearbeitet werden:



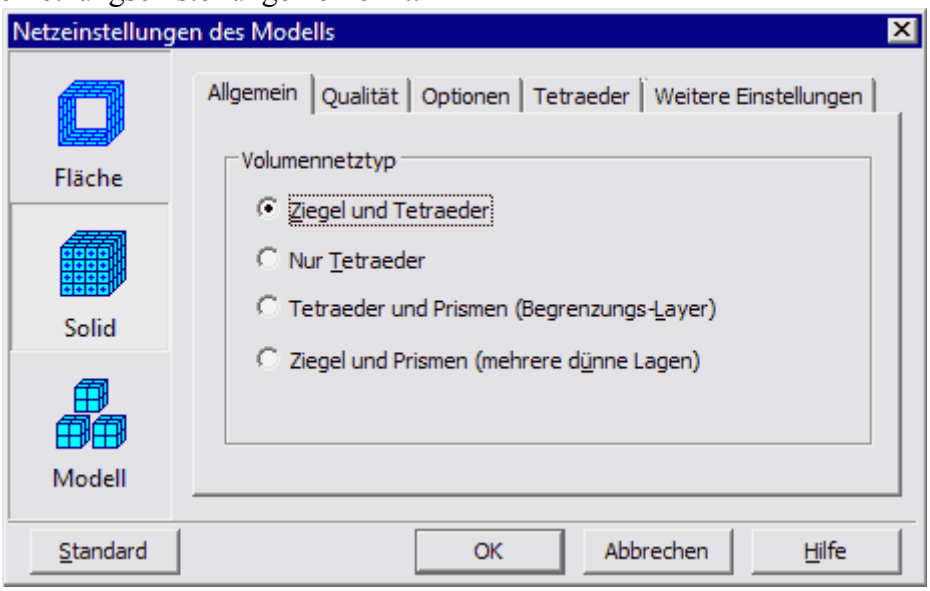
3D-Volumennetz

Das neue Entwurfsszenarium können wir nun unabhängig vom ersten Szenarium umgestalten. Da es nicht möglich ist, die Stift-Abhängigkeit mit Flächen-Netzen zu verwenden, müssen wir das Bauteil mit Volumen-Elementen neu vernetzen, wobei wir vorläufig die Standard-Einstellungen beibehalten:

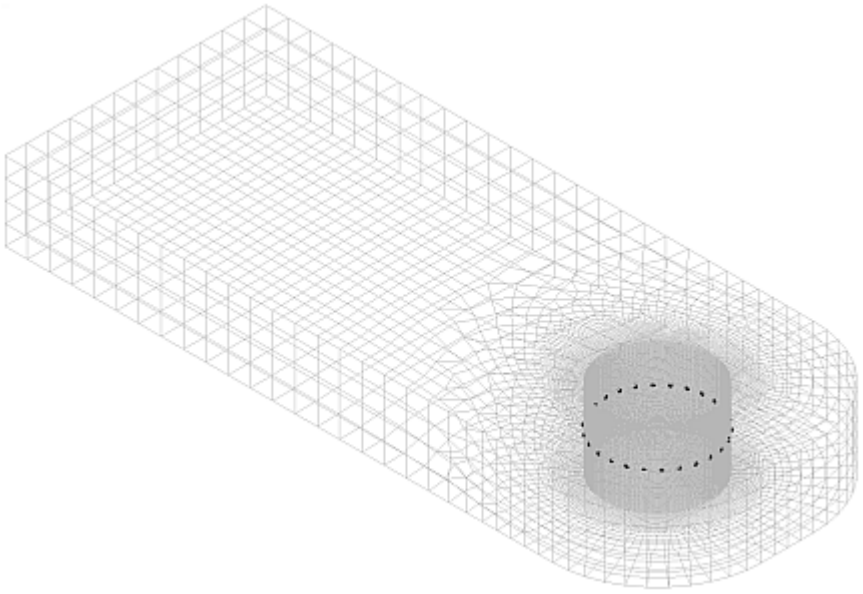




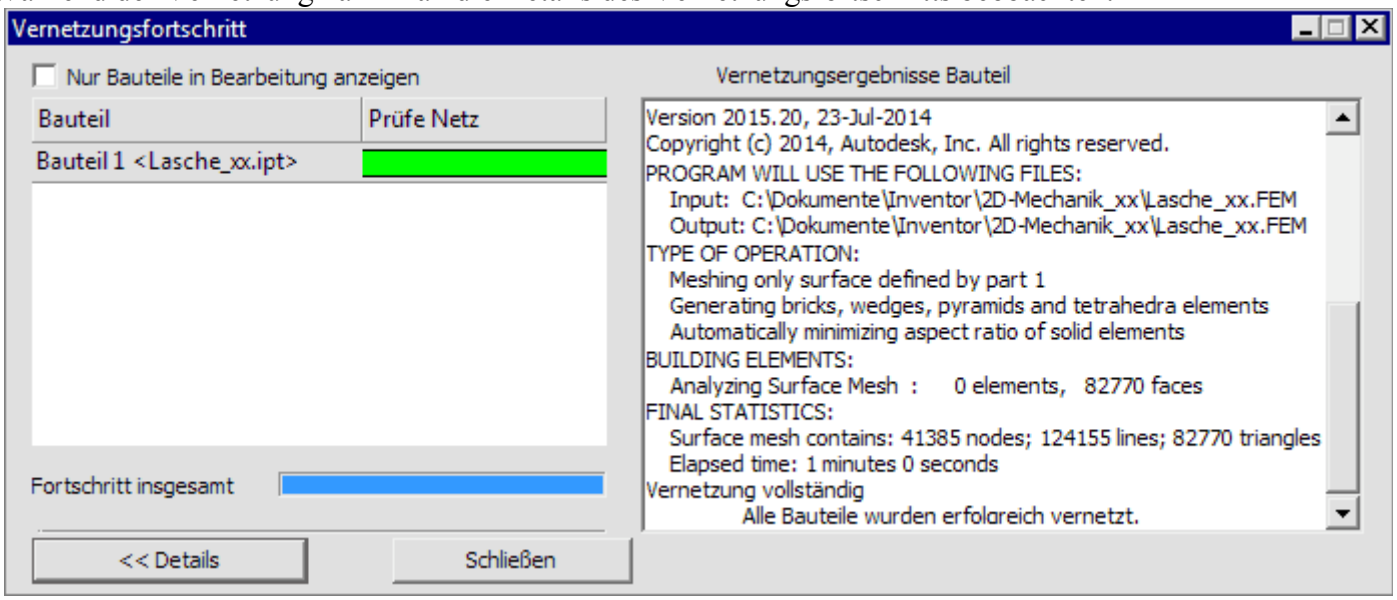
- Standardmäßig werden für die Solidvernetzung Quader (Ziegel) und Tetraeder verwendet, was man in den Optionen zu den Vernetzungseinstellungen erkennt:



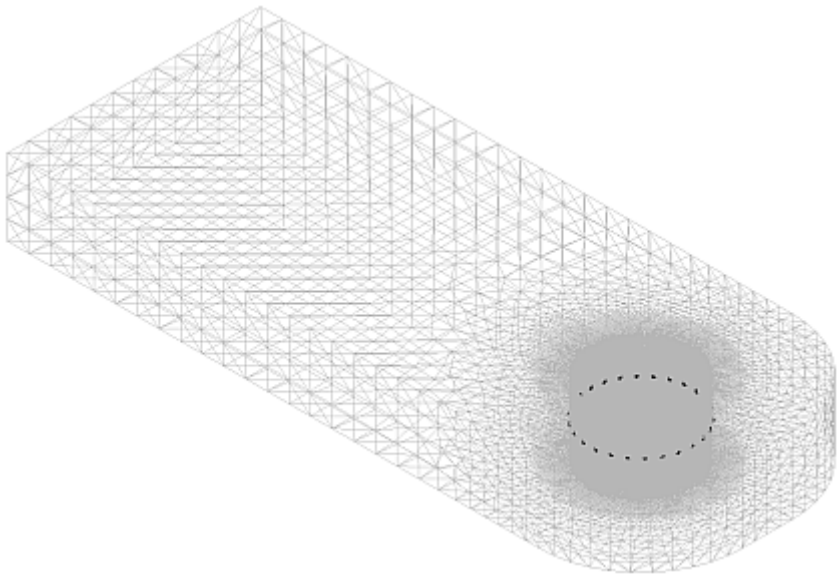
- Dies widerspiegelt sich dann in der überwiegenden Verwendung von Vierecken in den Oberflächennetzen. Dreiecke realisieren den Übergang zwischen unterschiedlichen Elementgrößen. Behält man die aus dem vorherigen Entwurfsszenarium übernommenen Verfeinerungspunkte bei, so entsteht mit **3D-Netz erstellen** nach längerem Warten (ca. 1 Minute) das folgende Oberflächennetz:



- Während der Vernetzung kann man die Details des Vernetzungsfortschritts beobachten:

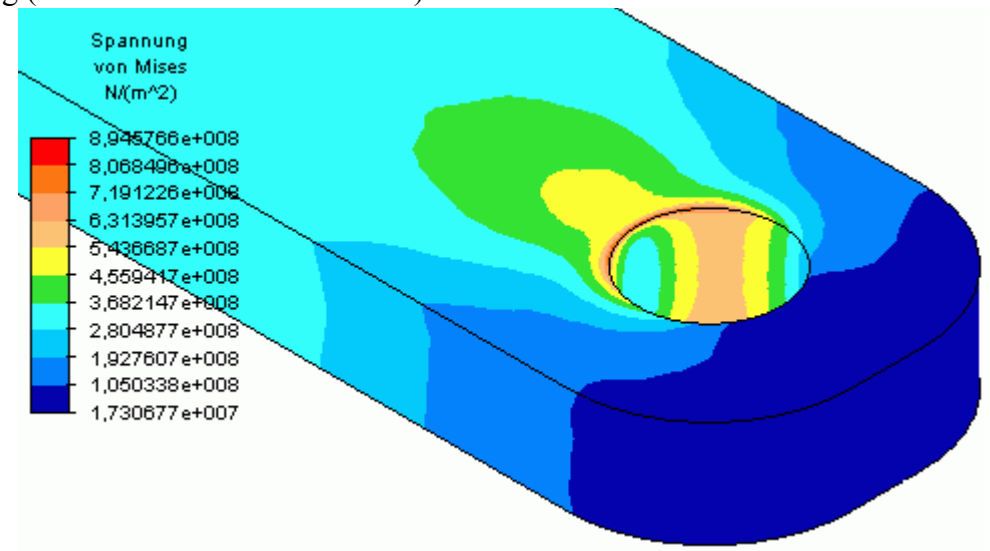


- Bei der gemischten Verwendung von Quadern und Tetraedern ist es im Beispiel nicht möglich, aus dem oben gezeigten Oberflächennetz im nächsten Schritt die Volumen-Vernetzung vorzunehmen (manueller Abbruch nach ca. 45 Minuten!).
- Für die Solid-Vernetzung sollte man bei Netzverfeinerung **nur Tetraeder-Elemente verwenden** (in den **Optionen der Netzeinstellungen** umschalten!). Das reine Tetraeder-Netz führt zwar nicht zum effektivsten Finite-Element-Modell, wird aber von der automatischen Vernetzung gut beherrscht.
- Mit den vorhandenen Verfeinerungspunkten ergibt sich nach Aufruf von "**3D-Netz erstellen**" folgendes Oberflächennetz aus Dreiecken:

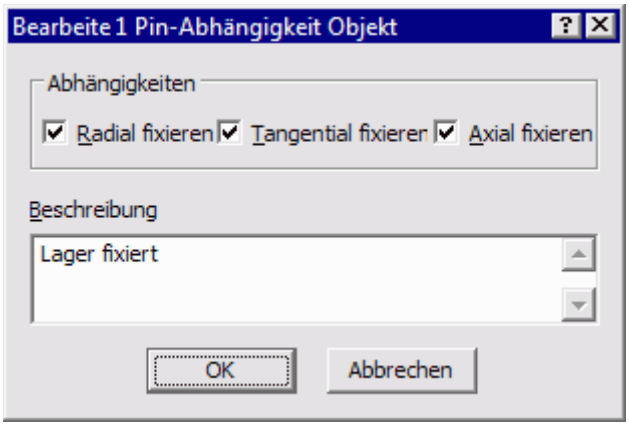


Wichtig:

- Die Funktion **3D-Netz erstellen** beschränkt sich nur auf die Erstellung des Oberflächennetzes, trotzdem ist die Berechnung schon recht zeitaufwändig.
- Das Volumen selbst wird damit noch nicht vernetzt! Man erhält damit jedoch einen "oberflächlichen" Eindruck zur Qualität des Netzes.
- Bevor man mit der noch viel aufwändigeren Volumenvernetzung beginnt, sollte man eine Verfeinerung des Netzes nur an den wirklich erforderlichen Stellen vornehmen. Damit reduziert man die Anzahl der zu generierenden Elemente.
- Die Konzentration der Netzverfeinerung auf die relevanten Stellen setzt Erfahrungswissen zu den Eigenschaften der berechneten Feldverläufe voraus. Da dieses dem Anfänger noch weitestgehend fehlt, hier als Ersatz die Ergebnisse der FEM-Simulation des vollständig fixierten Loches auf Basis obiger Netzverfeinerung (**Simulation NICHT starten!**):



- Auf die Stirnfläche des FEM-Modells wirkt eine Zugkraft von **10000 N**. Die Stiftabhängigkeit im Loch besitzt vollständig fixierte Freiheitsgrade (Lochrand komplett fixiert).



- Der berechnete Spannungsverlauf entspricht damit auch wertmäßig den Ergebnissen aus dem Flächennetz der Mittelebene.
- Zusätzlich erscheinen jetzt jedoch Spannungsspitzen direkt am Rand des Loches, welche durch das Flächennetz nicht berücksichtigt wurden.
- Eine Netzverfeinerung ist nur erforderlich, wo sich der Feldverlauf stark ändert. Dies ist nur direkt an den Kanten des Loches der Fall. Die Innenfläche selbst ist unkritisch und bedarf keiner extremen Netzverfeinerung.
- Mit diesem Wissen werden wir die Vernetzung im Folgenden ändern.

Kantenverfeinerung

Hinweise zu Tastenkombinationen bei der Objekt-Auswahl:

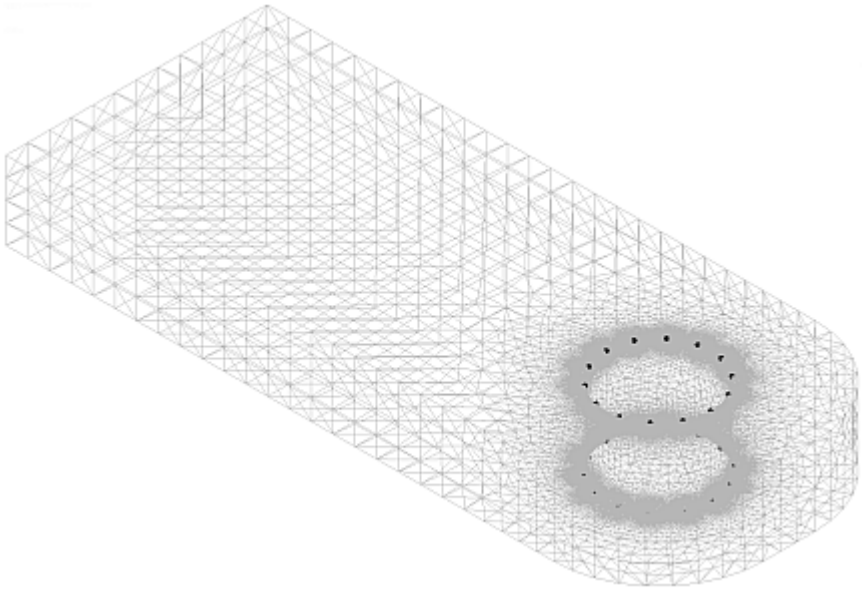
- **ohne Taste** - ersetzt die bestehende Auswahl durch die neu gewählten Objekte
- **<Strg>** - Auswahl wird im erfassten Bereich umgekehrt
- **<Umschalt>** - Objekte des erfassten Bereiches zur bestehenden Auswahl hinzufügen
- **<Strg><Umschalt>** - bestehende Auswahl wird um Objekte des erfassten Bereiches reduziert

Die extrem feine Vernetzung ist bei vollständiger Fixierung aller Freiheitsgrade nur an den Kanten des Loches erforderlich. Damit besteht die Möglichkeit die Größe des Netzes wesentlich zu reduzieren, so dass wir die erforderlichen Simulationen im Rahmen der Übung durchführen können. dabei gehen wir schrittweise wie folgt vor:

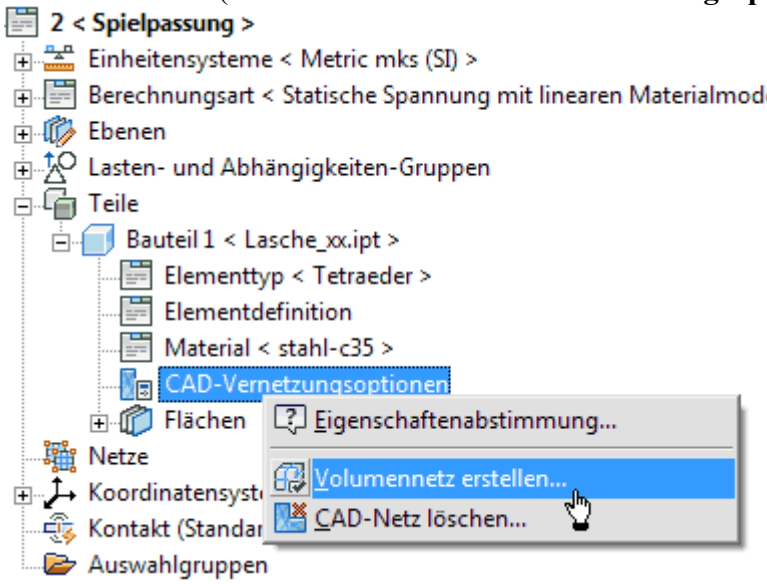
- Löschen der vorhandenen Verfeinerungspunkte
- "3D-Netz erstellen" führt zu einer Tetraeder-Vernetzung mit gleichmäßiger Elementgröße.
- Ansicht > Visueller Stil > Netz
- Auswahl aller Knoten im Loch (mit Kreis-Auswahl in Draufsicht)
- Entfernen aller Knoten aus der Auswahl, welche nicht auf den Lochkanten liegen:

1. Seitenansicht wählen
2. Rechteck-Auswahl zusätzlich mit Tasten-Kombination **<Strg><Umschalt>** entfernt die ausgewählten Knoten im Loch
3. alle ausgewählten Kantenpunkte hinzufügen zu den Verfeinerungspunkten

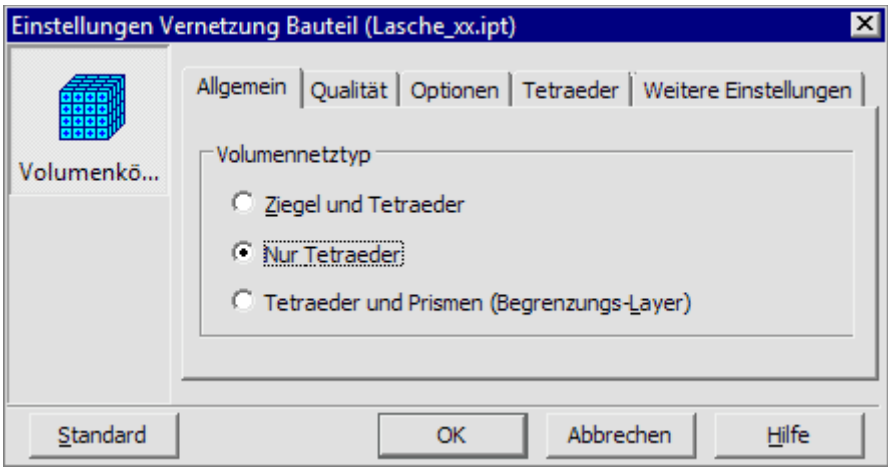
- Wirkungsradius **0,5 mm**
- Netzgröße **30 µm** (**50 µm in 32-Bit-Systemen** wegen Speicherplatz)
- Damit entsteht durch "**3D-Netz erstellen**" im Beispiel ein Oberflächennetz aus 62710 Dreiecken:



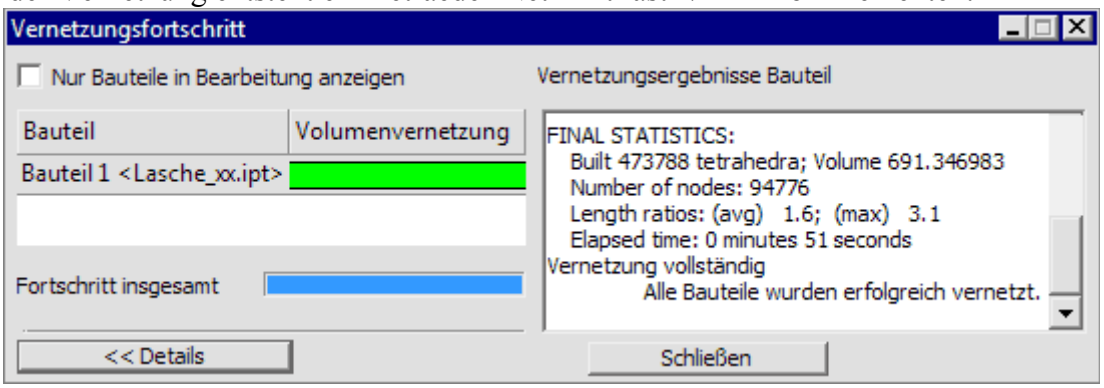
- Das Volumennetz würde zwar automatisch als erster Schritt beim "Simulation ausführen" generiert. Da die Erzeugung des Volumennetzes häufig ein langwieriger und auch fehleranfälliger Prozess ist, sollte man diesen Schritt jedoch bereits vorher ausführen (**Kontextmenü** von **CAD-Vernetzungsoptionen**):



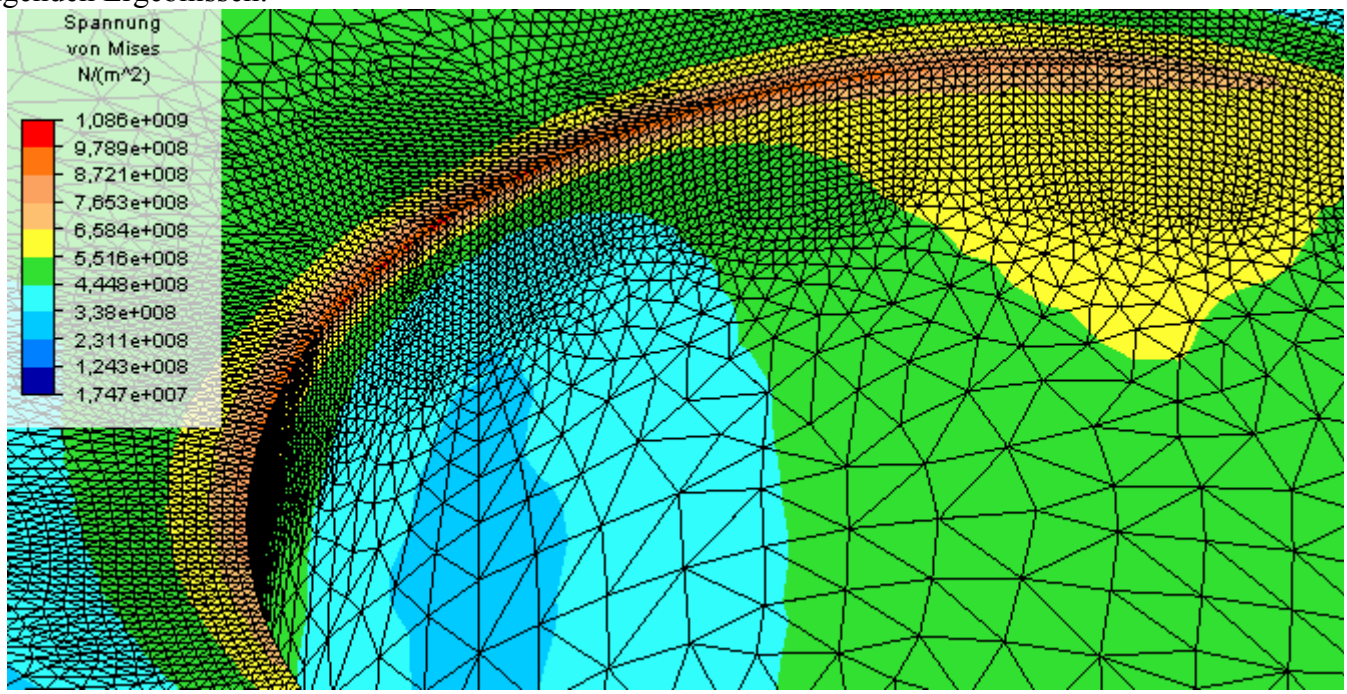
- Die vor der Vernetzung erscheinenden Vernetzungseinstellungen quittieren wir ohne Änderung mit **OK**:



- Im Ergebnis der Vernetzung entsteht ein Tetraeder-Netz mit fast 1/2 Million Elementen:



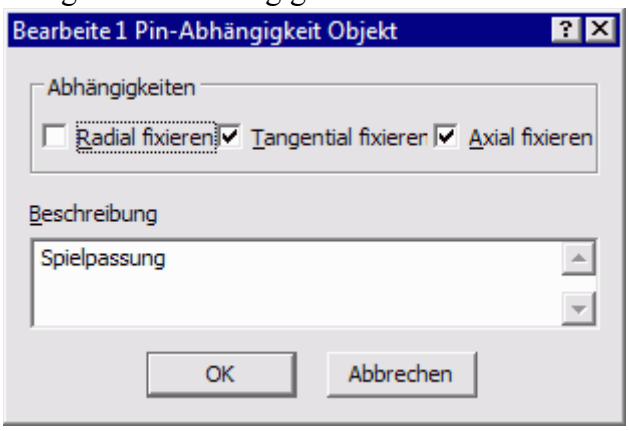
- Die Netzreduktion macht sich positiv in der Simulationszeit bemerkbar und führt an den Lochkanten zu folgenden Ergebnissen:



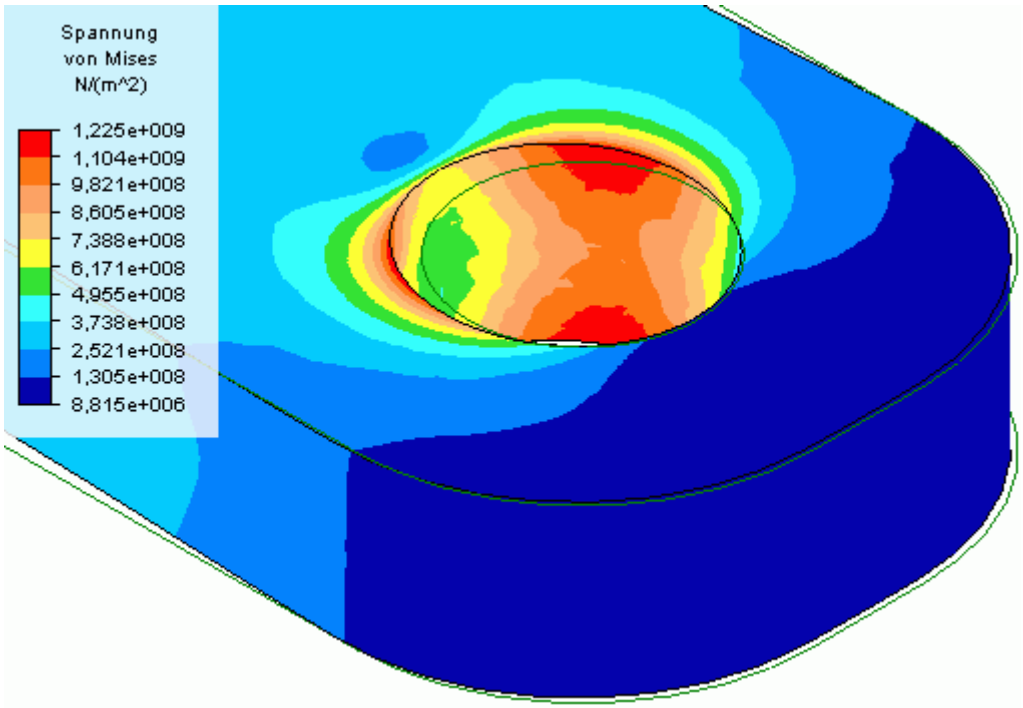
- Die berechnete Maximalspannung an den Lochkanten hat sich infolge der feineren Vernetzung im Vergleich zur vorherigen Simulation erhöht (im Beispiel um ca. 10%).
- Eine Verfeinerung der Kantenvernetzung würde diese berechneten Spannungsspitzen weiter vergrößern. Zum einen würde die Berechnungszeit damit stark ansteigen. Zum anderen ist es fraglich, ob diese Spannungsspitzen in der realen Lagerstelle überhaupt auftreten.
- Die Lasche verringert ihre Dicke durch die Streckung beim Anliegen der Zugkraft. Im Modell entstehen diese Spannungsspitzen als Scherspannung an der Lochkante, weil die Fixierung des Lochrandes eine Dickenänderung der Lasche direkt am Lochrand verhindert.
- Im Bereich bis zu ca. 600 MPa entsprechen die berechneten Spannungsbelastungen des 3D-Netzes ungefähr den Ergebnissen des Flächen-Netzes der Mittelebene.

Passung

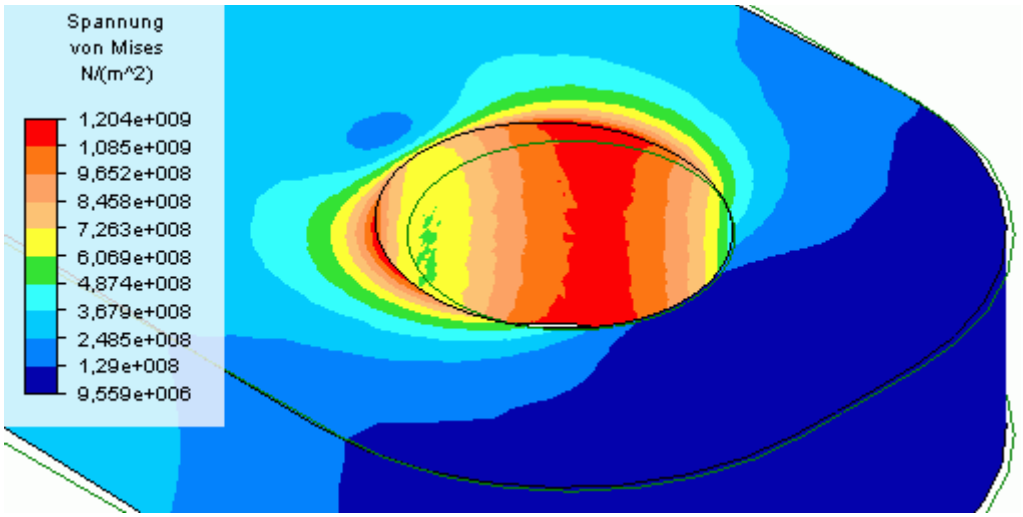
Wir haben nachgewiesen, dass ein 3D-Modell für den fixierten Lochrand ähnliche Ergebnisse berechnet, wie das Flächenmodell in der Mittelebene. Im nächsten Schritt soll nun untersucht werden, in welchem Maße die Befestigung der Lasche auf dem Bolzen seine Belastung beeinflusst. Dafür lösen wir die "Verschweißung" auf dem Bolzen, indem wir die radiale Fixierung der Stiftabhängigkeit lösen:



- Damit kann sich das Loch infolge der anliegenden Zugkraft verformen und die Lochwand liegt nicht mehr ringsum "gedachten" Bolzen:



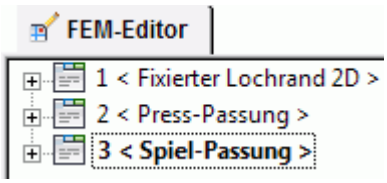
- Die Nachbildung einer Spielpassung gelingt mit der Stiftabhängigkeit nur näherungsweise. Es findet nur eine Lochaufweitung in radialer Richtung statt. Eigentlich müsste auch eine tangentiales "Fließen" des Materials um den Bolzen stattfinden.
- Die Freigabe der tangentialen Fixierung ist nicht möglich, denn sie führt zu einer Unbestimmtheit der Lagerposition in der XY-Ebene.
- Es liegt der Verdacht nahe, dass infolge der relativ groben Vernetzung innerhalb des Loches die Spannungsverläufe im Loch ungenau berechnet werden.
- **Im Rahmen der Übung NICHT durchführen:** Eine Berechnung nach Verfeinerung des gesamten Loches würde diesen Verdacht bestätigen:



- Der Bereich der maximalen Belastung zieht sich durch die gesamte Lochhöhe. Die Mises-Spannung in diesem Bereich resultiert überwiegend aus der Spannung in Zugrichtung.
- ***Fazit:*** Die Nachbildung einer Spiel-Passung mittels Stiftabhängigkeit gelingt nur unzureichend. Nachgebildet wird damit eher eine leichte Press-Passung.

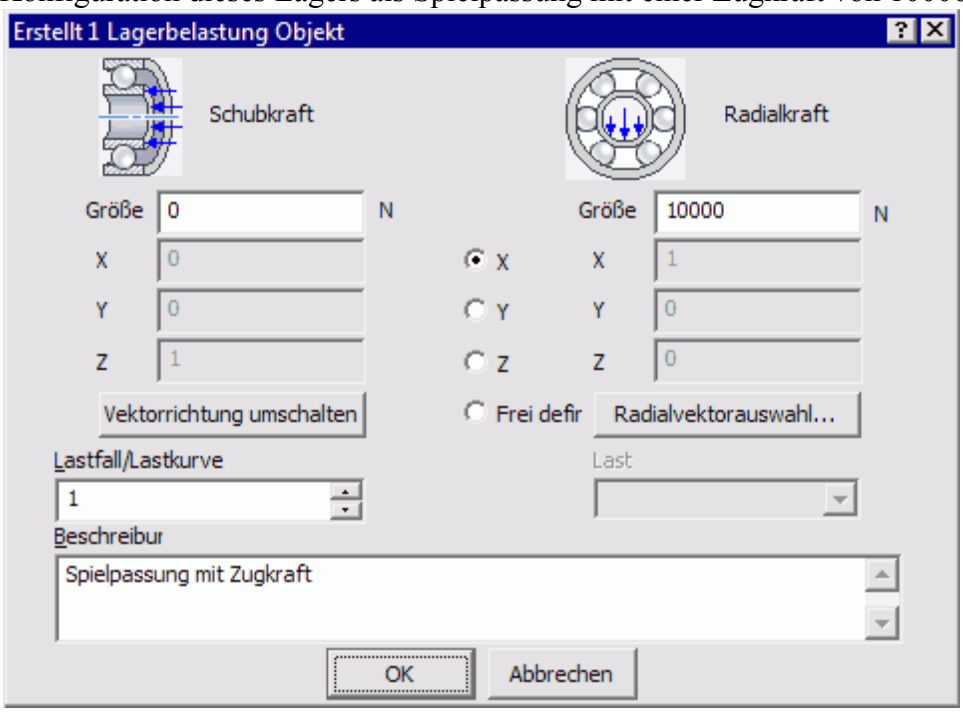
Spiel-Passung

Mit unserem Wissen versuchen wir nun, mittels der sogenannten Lager**-Traglast** doch noch eine Spielpassung nachzubilden:

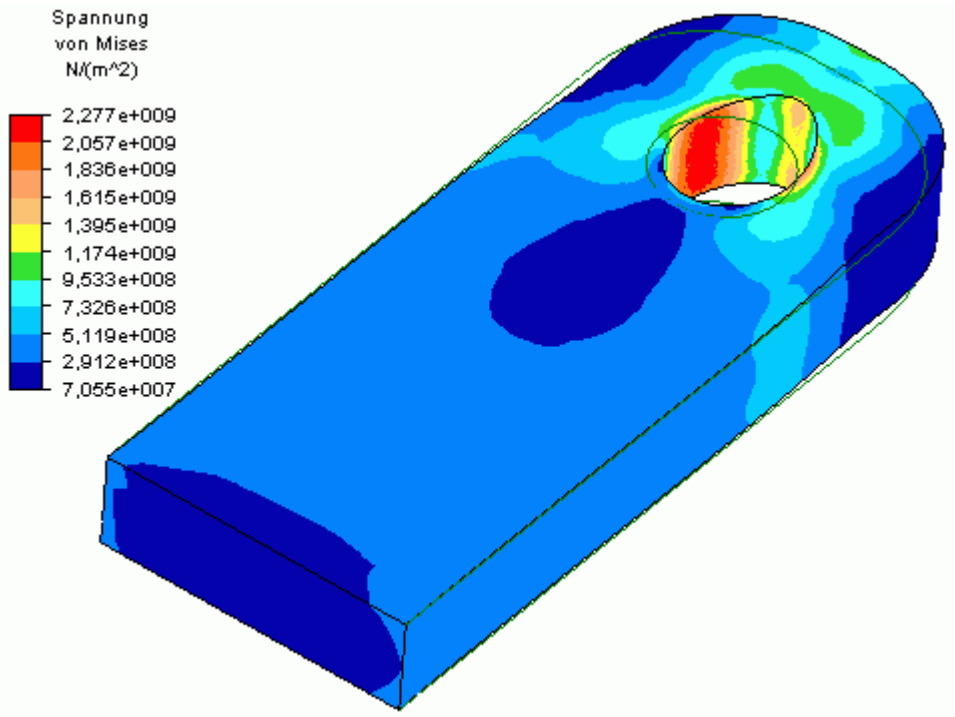


- Wir erzeugen dazu ein weiteres Entwurfsszenarium auf der Grundlage der bisherigen "Spielpassung".
- Unsere "irrtümliche" Spielpassung benennen wir um in **Press-Passung**.
- Das neue Szenarium soll nun **Spiel-Passung** heißen.
- Die Netzverfeinerung im Loch behalten wir bei.
- Last und Abhängigkeit vertauschen wir in diesem Szenarium:
  - Wir ersetzen die Zugkraft durch eine Fixierung der Stirnfläche
  - Wir ersetzen die Stiftabhängigkeit durch eine Lager**-Traglast**

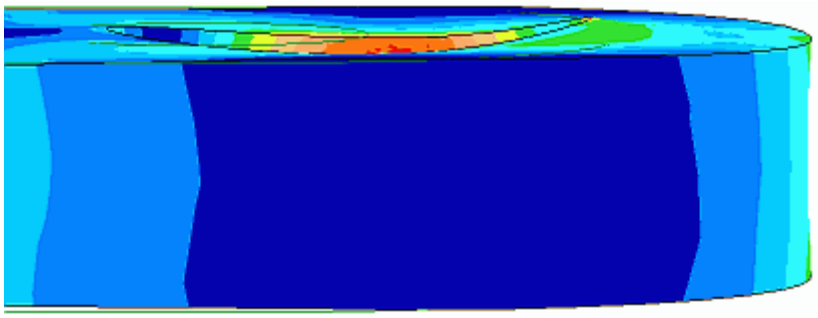
Entscheidend ist die Konfiguration dieses Lagers als Spielpassung mit einer Zugkraft von 10000 N:



- Die Ergebnisse für die Mises-Spannung sind ähnlich, wie bei der vorherigen "Press-Passung":



- Auch hier ist die größte Belastung an den Flanken des Loches. Die berechneten Maximalwerte sind jedoch bedeutend höher!
- Die Verformung des Loches infolge des Ziehens am Bolzen erscheint realistisch.
- Die inhomogene Mises-Spannung an der Stirnfläche resultiert aus der Fixierung der Fläche. Dies verhindert eine Einschnürung der Lasche infolge der Zugbelastung.
- Interessant ist die zu beobachtende Verformung im Bereich des Loches in Z-Richtung:



- Deutlich zeigt sich eine Wulst in Schubrichtung vor dem Bolzen.

Frage 2:
Wie groß ist die maximal zulässige Zugkraft bei Verwendung einer Spielpassung auf biegesteifem Bolzen, damit der Sicherheitsfaktor 2 an keiner Stelle des Modells unterschritten wird?

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_Spielpassung&oldid=16323“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - vertiefende Videos

Aus OptiYummy
↑

← →

Zusammenfassende Vertiefung (Intro-Videos von Autodesk)

Von Autodesk werden in der Online-Hilfe eine Reihe von Video-Clips bereitgestellt, welche eine Einführung in die Systembedienung und grundlegende Aspekte der Finite-Element-Methode bieten:

- Als totaler Neuling hat man jedoch Probleme, inhaltlich und begrifflich den ansonsten sehr guten Tutorials zu folgen.
- Inzwischen haben wir jedoch anhand der Übungsaufgabe bereits einen Eindruck von dieser Form der Simulation erhalten.
- Deshalb ist jetzt ist ein günstiger Zeitpunkt, anhand der folgenden Videos unser Wissen zur Programm-Bedienung und zur Finite-Element-Methode zu festigen und teilweise zu erweitern. Jeder Abschnitt (außer dem letzten) besteht aus mehreren Videos mit einer Gesamtdauer von ca. 1/2 h. Man sollte also ungefähr 2 h für diese Lektionen einplanen:

    1. **Navigation in der Benutzeroberfläche**
    2. **Multifunktionsleiste und Arbeitsablauf**
    3. **Netzerstellung von CAD-Modellen**
    4. **Lagerbelastungen und Stiftabhängigkeiten**

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_vertiefende_Videos&oldid=16180“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - manuell - Geometrie

Aus OptiYummy
↑

← →

Geometrie-Modellierung im FEM-Editor

Finite-Element-Modelle werden nur durch ihre Netze repräsentiert. Geometrie-Modelle werden für die Finite-Element-Simulation nicht mehr benötigt:

- Man benutzt Geometrie-Modelle nur als "Rahmen" für das Aufspannen der Finite-Element-Netze.
- Im Normalfall wird man ein vorhandenes CAD-Modell als Geometrie in das FEM-Programm importieren. Aus dem CAD-Modell werden auch die Materialdaten für das Finite-Element-Modell übernommen.

Manchmal in es sinnvoll, die Geometrie der zu untersuchenden Bauteile direkt im FEM-Programm zu modellieren, z.B.:

1. es existiert noch kein CAD-Modell (z.B. weil in frühen Entwurfsphasen erst vage Vorstellungen zur geometrischen Gestaltung existieren)
2. es existiert ein sehr detailliertes CAD-Modell, aber die Belastungsanalyse soll wegen seiner Komplexität auf die real belasteten Komponenten beschränkt werden (sehr starke Abstraktion der Geometrie)

Wir nutzen im Rahmen dieses Übungskomplexes das Beispiel des Bauteils "Lasche", um die unterschiedlichen Möglichkeiten innerhalb des FEM-Prozesses zu erkunden:

- Bei der manuell erstellten Geometrie beschränken wir uns auf 2D-Modelle der Lasche.
- Dafür definieren wir eine neue FEM-Datei **2D-Lasche_xx.fem** ((mit **xx**=Teilnehmer-Nr. 00...99).

2D-Modelle:

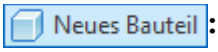
- Falls es möglich ist, ein 3D-Problem der Strukturmechanik auf ein 2D-Modell abzubilden, führt dies zu einer enormen Reduzierung des zu lösenden Gleichungssystems.
- Zum einen reduziert sich die Anzahl der Elemente und zum anderen müssen pro Element nur zwei Freiheitsgrade berechnet werden (Verschiebungen der Knoten in der Ebene).
- **Zwei Typen von 2D-Elementen:**

    1. **Achsensymmetrisch:** zum Modellieren von Volumenkörpern, die in Bezug auf Geometrie, Last und Randbedingungen symmetrisch zur Z-Achse sind. Negative Y-Koordinaten sind nicht zulässig. Das 2D-Netz entspricht einem "unendlich dünnen Tortenstück" aus dem Rundkörper.
    2. **Layernspannung** bzw. **Layerndehnung**: zum Modellieren von Volumenkörpern, die man auf eine Schnittebene reduzieren kann (z.B. Längsschnitt durch dünne Platte bzw. Querschnitt eines Staudamms).

Wichtig:

- 2D-Elemente können nur in der **YZ-Ebene** des globalen Modell-Koordinatensystems definiert werden!
- Siehe auch **Online-Hilfe zu 2D-Elementen** von *Autodesk Simulation Mechanical*.

In der FEM-Editor-Umgebung von *Autodesk Simulation Mechanical* kann man Geometrie-Modelle mithilfe der Befehle auf der Registerkarte **Zeichnen** erstellen und ändern:

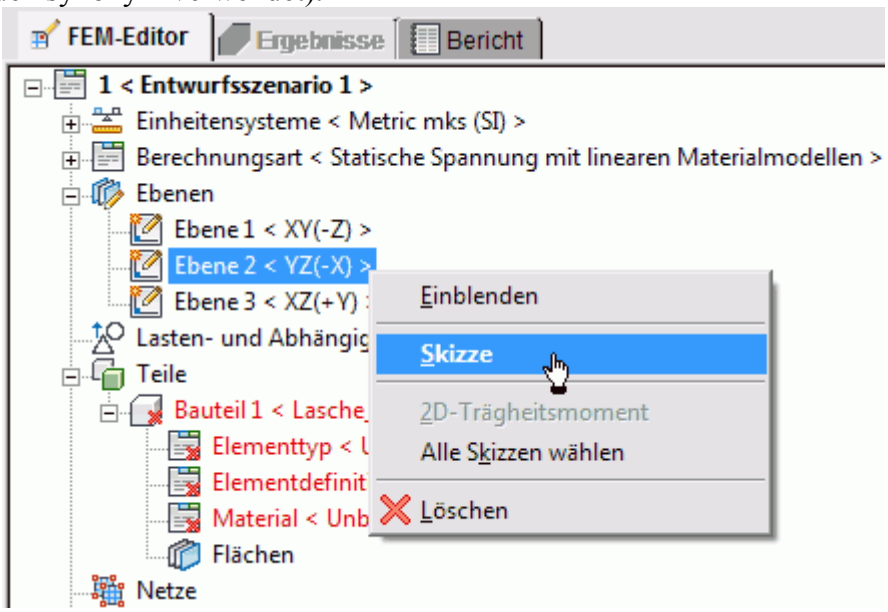
1. 

:

- Die **Konstruktion** des Geometrie-Modells erfolgt strukturiert nach Bauteilen.
- Das neue Bauteil versehen wir mit dem Bezeichner **Lasche_xx** (**xx**=Teilnehmernummer):

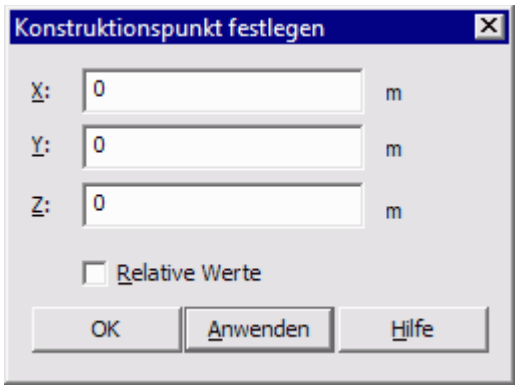
2. Zeichnungsebene:

- Zeichnungsebenen werden verwendet, um Geometrie zum Modell hinzuzufügen.
- Ein Bauteil kann beliebig viele und beliebig im Raum angeordnete Zeichnungsebenen enthalten (z.B. Blechwinkel aus zwei orthogonalen Ebenen).
- Die Ebenen des XYZ-Koordinatensystems werden als vordefinierte Ebenen bereitgestellt.
- Wir benötigen nur die Kontur der Lasche in der **YZ-Ebene**.
- Um eine Ebene für das Hinzufügen von Geometrie verwenden zu können, muss man sie als Skizze aktivieren.
- Bei Verwendung einer Zeichnungsebene befindet sich der FEM-Editor im Skizziermodus (die Begriffe **Skizze** und **Zeichnung** werden synonym verwendet).

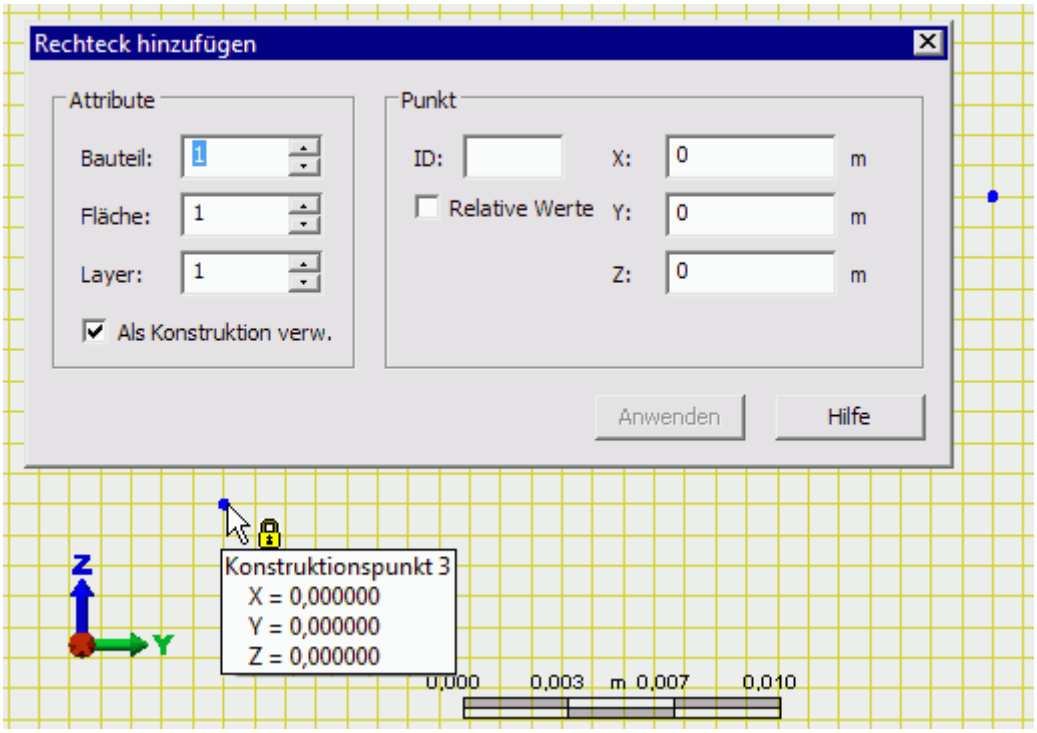


3. Arbeitsbereich:

- Wenn man sich im Skizziermodus befindet, wird im Anzeigebereich ein Raster angezeigt und die Zeichnungsebene wird in der Strukturansicht fett hervorgehoben.
- Der sichtbare Arbeitsbereich von über 400 m² ist in der Standardeinstellung mit 1 m Rasterabstand für unser Bauteil viel zu groß!
- Wir beginnen durch Skizzieren der äußeren Bauteil-Abmessungen mit der Bestimmung des erforderlichen Arbeitsbereiches.
- Ein Rechteck wird im Skizziermodus definiert durch die Eingabe von 2 diagonalen Eckpunkten. Leider wurde noch keine Möglichkeit gefunden, diese Koordinatenwerte manuell einzugeben. Die Eingabe der Eckpunkt-Koordinaten ist nur mit dem Cursor möglich, der jedoch in einer leeren Skizze noch keine Punkte fangen kann.
- Deshalb beginnt man mit der Definition zweier **Konstruktionspunkte** mit den benötigten Eckpunkt-Koordinaten, welche man manuell eingeben kann:



- Im Unterschied zum CAD-Modell nutzen wir den Koordinaten-Ursprung **(0,0,0)** als linke untere Ecke des Rohteils. Damit vereinfachen wir die Eingabe der erforderlichen Koordinatenwerte.
- Nach dem Setzen des Konstruktionspunktes auf die rechte obere Ecke **(0, 0,025xx, 0,01)**, können wir mittels **Zoom (Fit all)** das Bauteil ansichtsfüllend abbilden.
- Unter ***MFL > Extras > Anwendungsoptionen > Entwerfen*** können wir die **Gitternetz-Teilung** auf **0,001 m** einstellen (falls dies noch nicht der Fall ist).
- Nun sollte das Zeichnen eines Rechtecks durch Auswählen der beiden Eckpunkte kein Problem mehr darstellen:

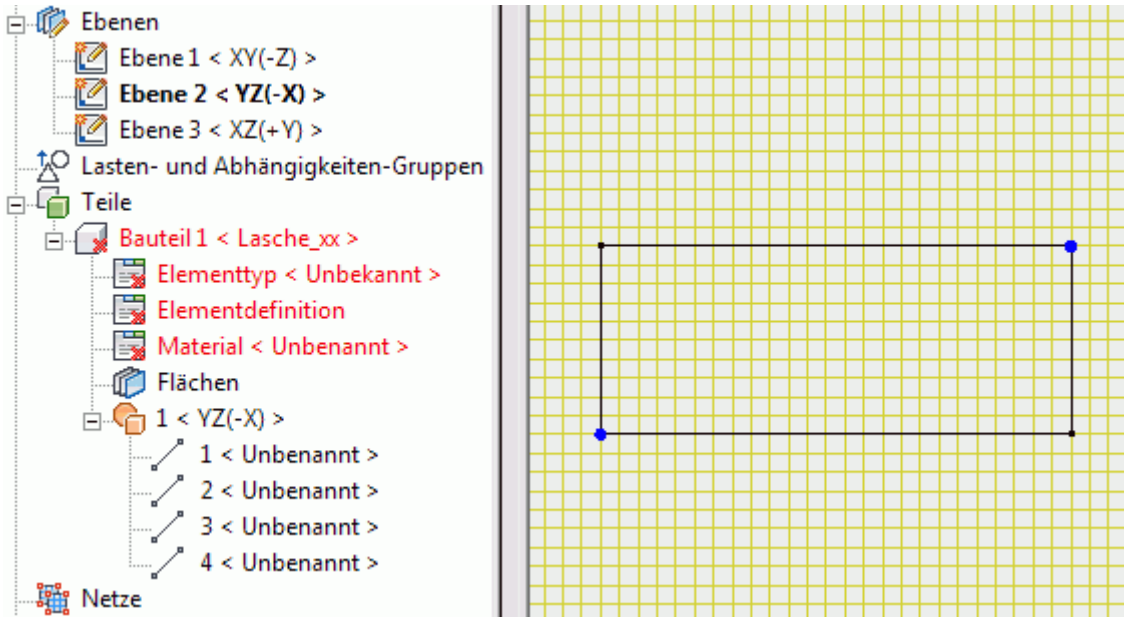


Hinweise:

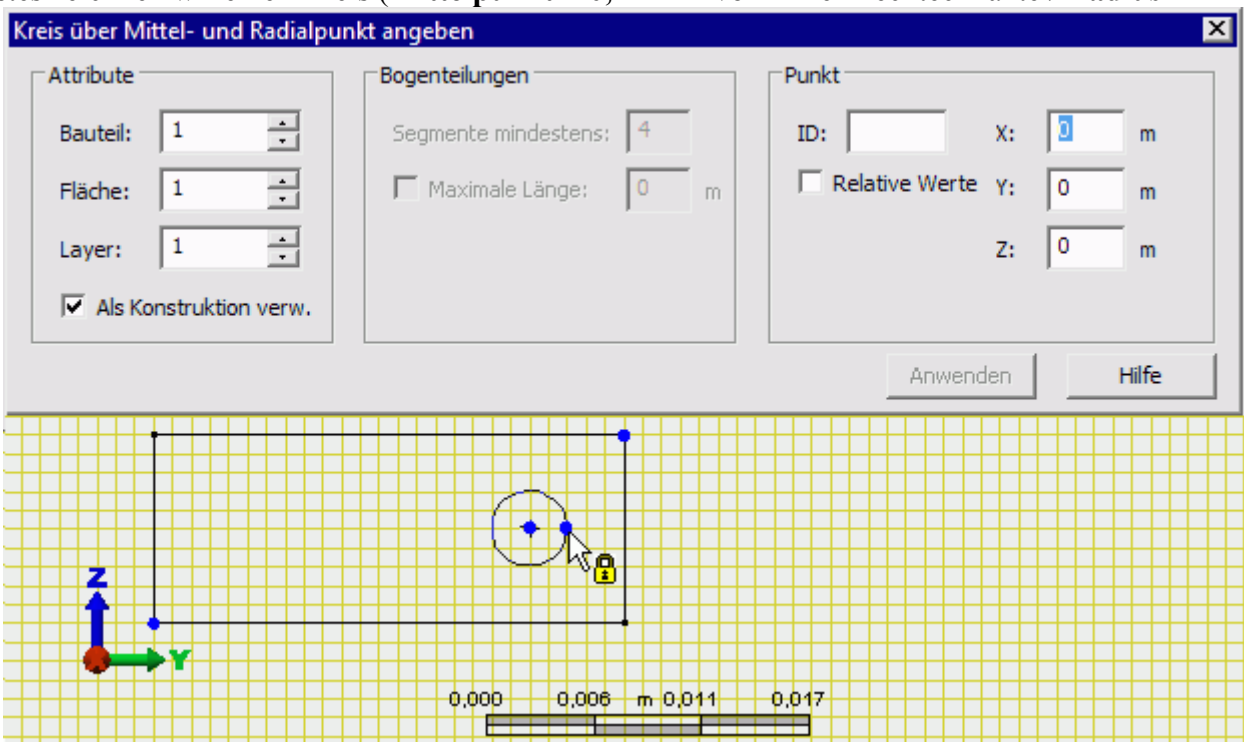
- Man bewegt den Cursor zu dem Punkt, dem man auswählen möchte. Wenn das Schlosssymbol angezeigt wird, klickt man mit der linken Maustaste, um den Punkt auszuwählen.
- Leider ist die Anzeige des Info-Fensters für das zu wählende Objekt anscheinend abhängig von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Grafikkarte.
- Nach Anzeige des Schlosses in der Nähe des Objektes erfolgt jedoch unabhängig vom eingeblendeten Info-Fenster die Übernahme der richtigen Koordinaten.

Standardmäßig werden Geometrieobjekte **als Konstruktion verwendet**. D.h., sie werden später nicht als Bestandteil des Netzes verwendet, sondern dienen nur als Rahmen für das Aufspannen des Netzes. Dies gilt jedoch nicht für Konstruktionspunkte, auf welche später dann in jedem Fall ein Netzknoten gelegt wird:

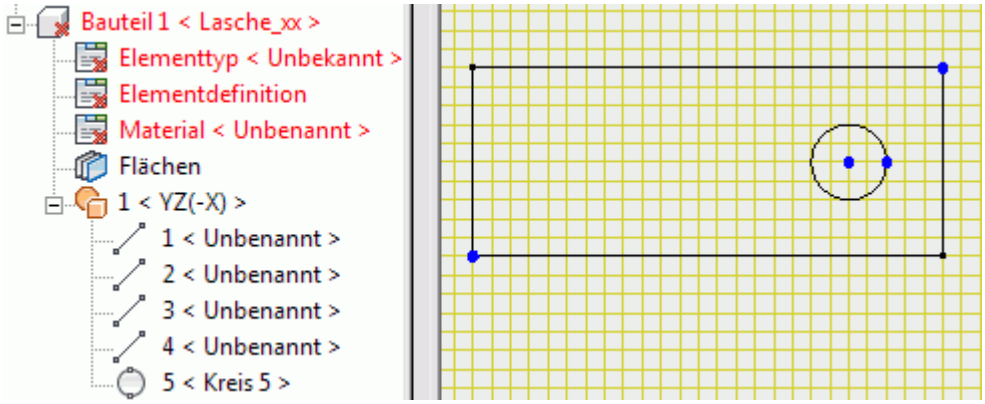
- Beim Hinzufügen eines Geometrieobjekts zu einer Skizze wird ein Zweig in den Zeichnungsebenen unter dem zugeordneten Bauteil erstellt, wenn man das Objekt für die Konstruktion verwendet.
- Ein Rechteck erscheint dabei in der Zeichnungsebene des Bauteils in Form von vier einzelnen Linien:

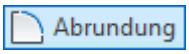


Als Nächstes zeichnen wir einen Kreis (**Mittelpunkt=20,xx mm** von linker Rechteckkante / **Radius=2 mm**):



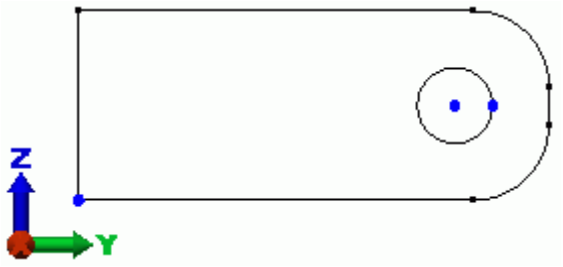
- Da wir einen Rasterabstand von 1 mm eingestellt haben, können wir im speziellen Fall den Fang von Rasterknoten nicht bei der Punkt-Eingabe benutzen (erscheint das Schloss-Symbol am Cursor, wird beim Mausklick der nächstgelegene Rasterpunkt gefangen).
- Wir müssen spezielle Konstruktionspunkte setzen und darauf achten, dass diese dann als Konstruktionsobjekte gefangen werden!
- Der Kreis ist danach ein weiteres Element in der Zeichenebene des Bauteils:



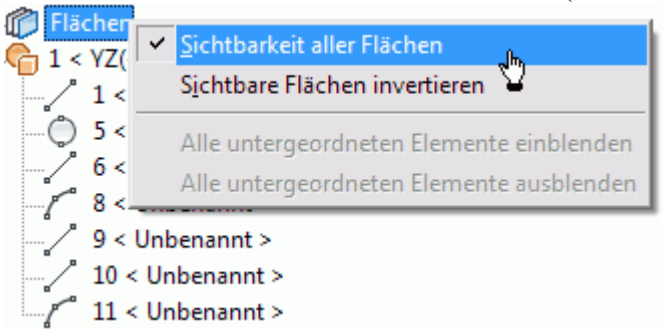


der beiden rechten Ecken des Rechtecks mit dem **Radius=4 mm**:

- Die Funktion **Abrundung** kann erst benutzt werden, wenn man zuvor das **Auswählen von Konstruktionsobjekten** aktiviert hat!
- **Wichtig:** Falls nach der Abrundung noch ein freistehender Konstruktionspunkt übrig ist, löschen wir diesen über sein Kontextmenü. Ansonsten würde bei der Vernetzung ein Knoten auf diesen Punkt gelegt werden, was störend wäre!
- Danach beenden wir den Skizzen-Modus und haben nun den Rahmen für die Erstellung eines Flächennetzes geschaffen:



Hinweis: Falls man (z.B. nach erneutem Laden der FEM-Datei) die konstruierte Geometrie nicht mehr sieht, muss man dafür innerhalb des Bauteils die **Sichtbarkeit aller Flächen** aktivieren (Kontextmenü):



←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_manuell_-_Geometrie&oldid=16328“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - manuell - Material

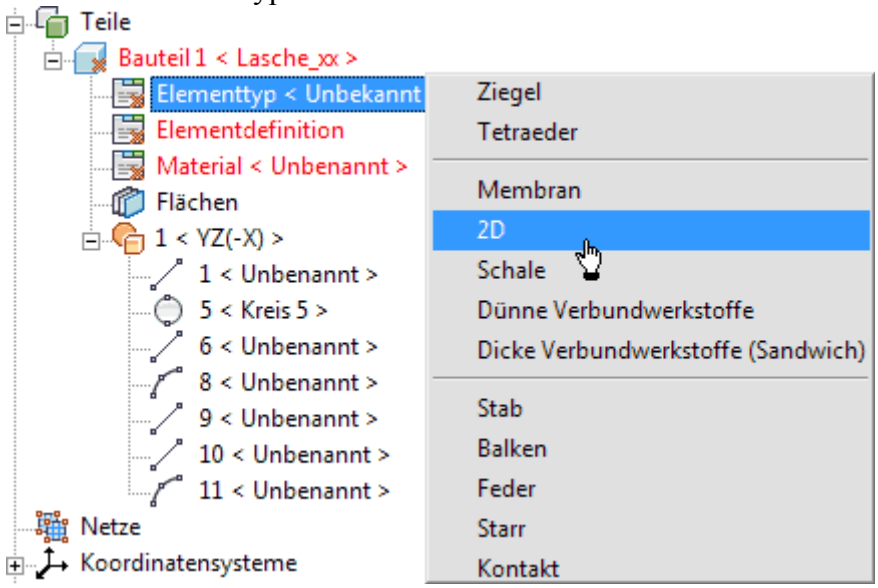
Aus OptiYummy
↑

← →

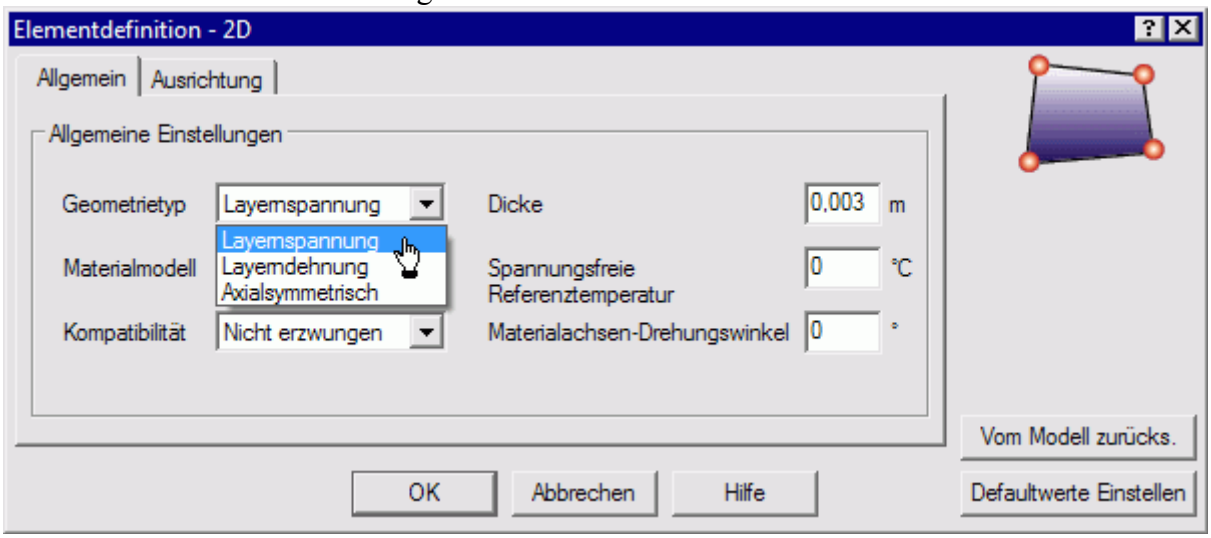
Definition physikalischer Eigenschaften (Material)

Die Material-Parameter kann man im *Autodesk Simulation Mechanical* erst bearbeiten, nachdem man die Elemente des Netzes spezifiziert hat, weil Anzahl und Typ der Material-Parameter teilweise von der Art der Elemente abhängt:

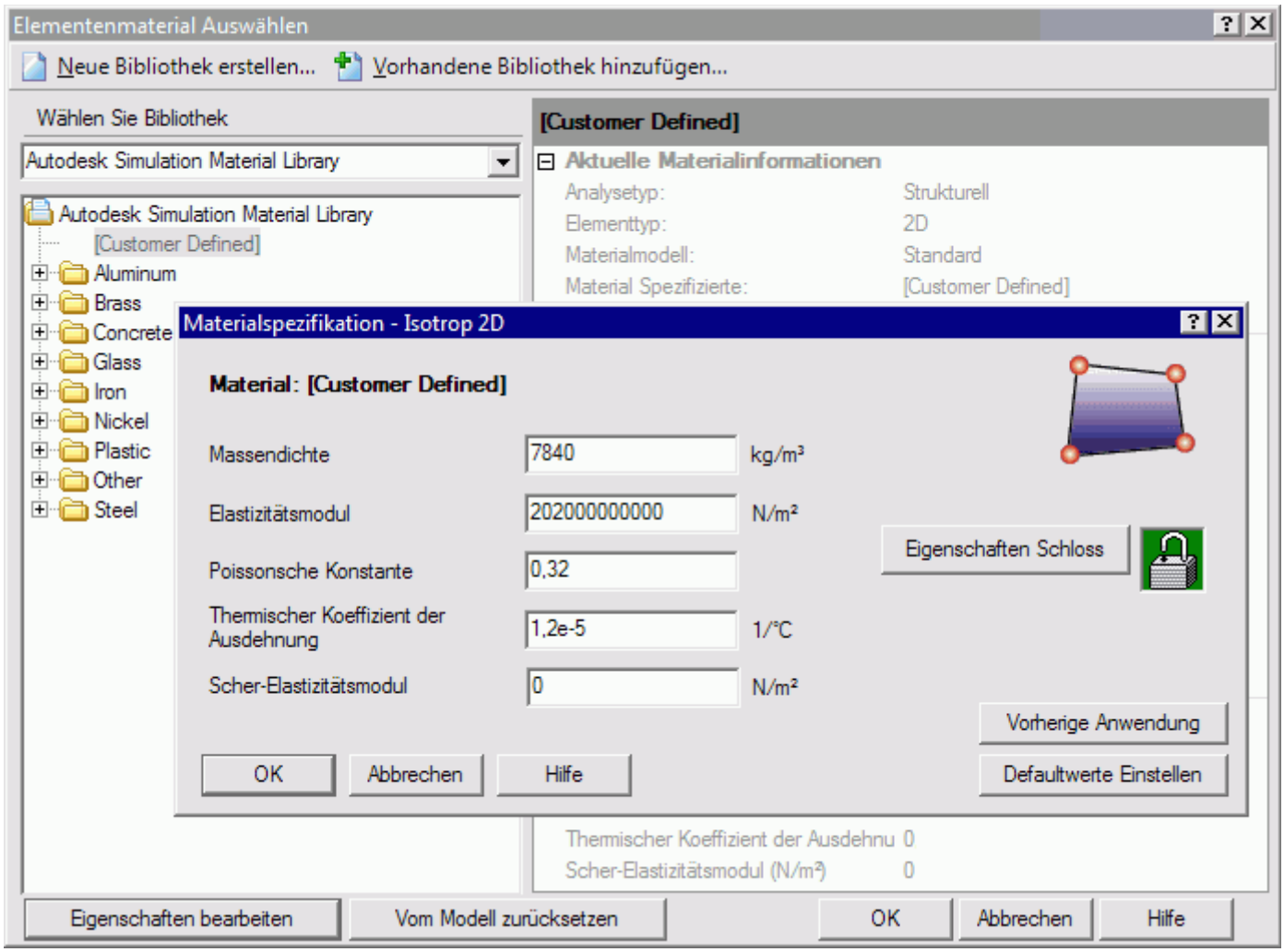
- Wie geplant wählen wir **2D** als Elementtyp:



- Danach kann man die **Elementdefinition bearbeiten**:
  - **Geometrietyp=Layernspannung** ist der geeignete Typ für unser dünnes Blechteil.
  - **Dicke=3 mm** müssen wir noch eintragen.



- **Material bearbeiten** zeigt nun leider nicht die Material-Parameter für Stahl-C35, da wir kein CAD-Modell importiert haben. Die Materialdaten der *Autodesk Simulation Material Library* sind für unseren Zweck nicht nutzbar, weil Stahl-C35 nicht enthalten ist. Wir können jedoch die Eigenschaften eines eigenen Materials für die Elemente bearbeiten (*Customer Defined*):



- Damit ist das Material für die Elemente definiert und wir können uns im nächsten Schritt der Vernetzung zuwenden.

←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_manuell_-_Material&oldid=16329“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - manuell - 2D-Netzgenerator

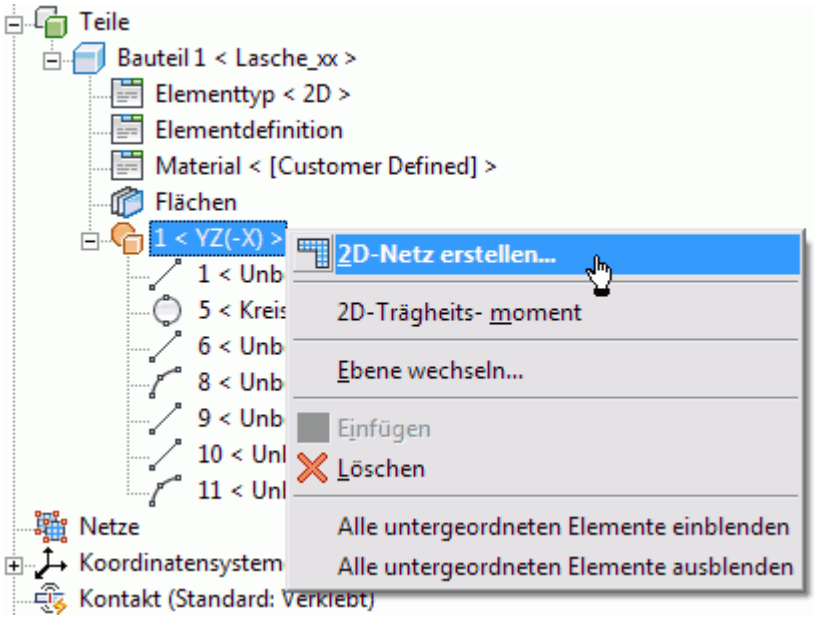
Aus OptiYummy
↑

← →
2D-Netzgenerator

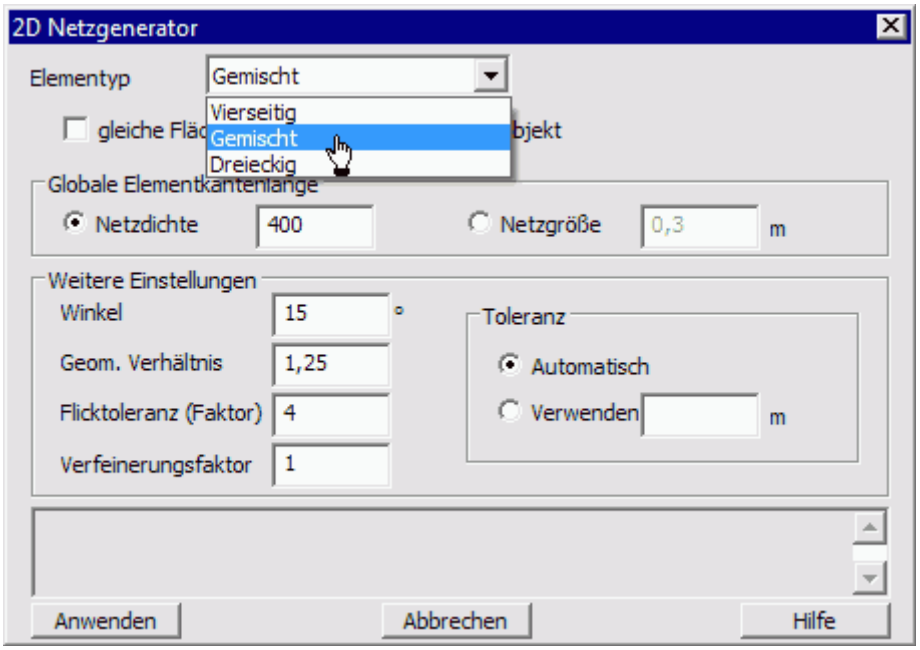
Globale Vernetzung

Der **2D Netzgenerator** ist ein Werkzeug für die automatische Vernetzung eines geschlossenen Bereiches innerhalb einer Ebene:

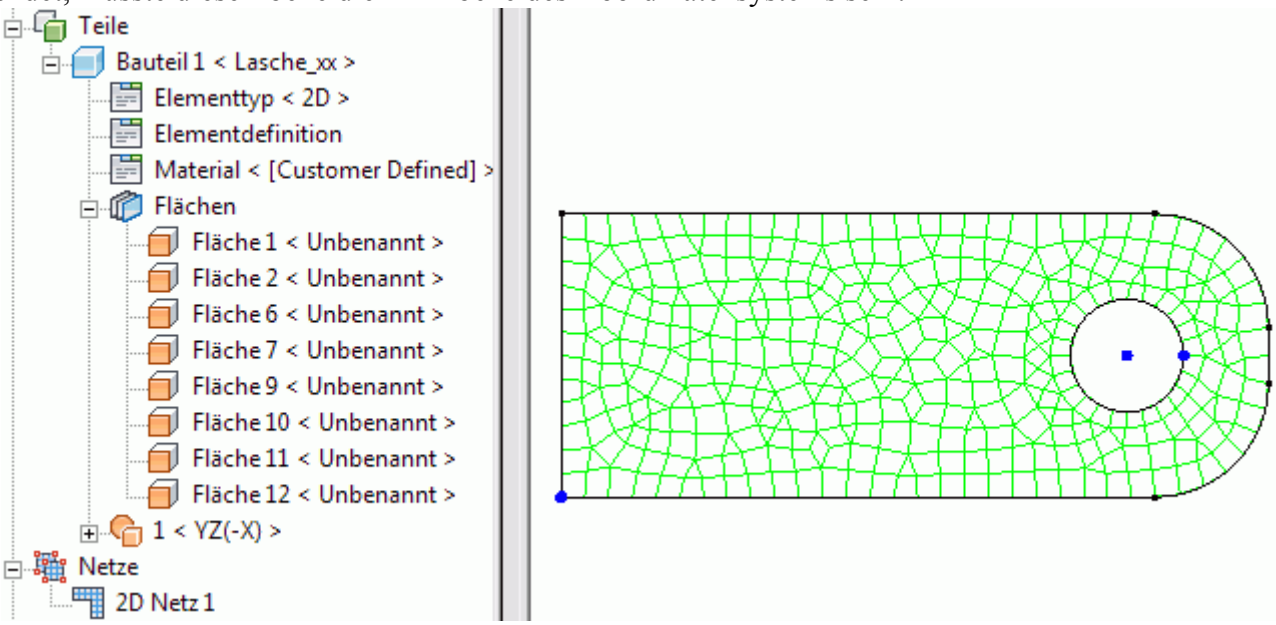
- Die 2D-Kontur unseres Bauteils haben wir manuell aus einzelnen Konstruktionsobjekten (Linie, Bogen, Kreis) in einer Skizzier-Ebene (YZ-Koordinatenebene) gebildet. Alle Konstruktionsobjekte dieser Skizzier-Ebene wurden als Bestandteil des Bauteils in einer gemeinsamen Ebene abgelegt (**1<YZ(-X)>**).
- Für diese Ebene aktivieren wir die Funktion **2D-Netz erstellen**:



- Wir verwenden am Anfang die Standvorgaben für die Vernetzung und wählen als **Elementtyp gemischt**, um 3-Ecke und 4-Ecke als Elemente zuzulassen:



- Der Wert der Netzdichte entspricht ungefähr der Anzahl der Elemente in einem Rechteck, das die Geometrie vollständig einschließt.
- Die Bedeutung aller Parameter ist im **Online-Handbuch** beschrieben.
- Der 2D-Netzgenerator erzeugt etwas andere Ergebnisse, als die Oberflächen-Vernetzung im Rahmen der 3D-Netzgenerierung und ist auf ebene Flächen beschränkt. Für unseren Spezialfall, dass man den Elementtyp 2D verwendet, musste diese Ebene die YZ-Ebene des Koordinatensystems sein:

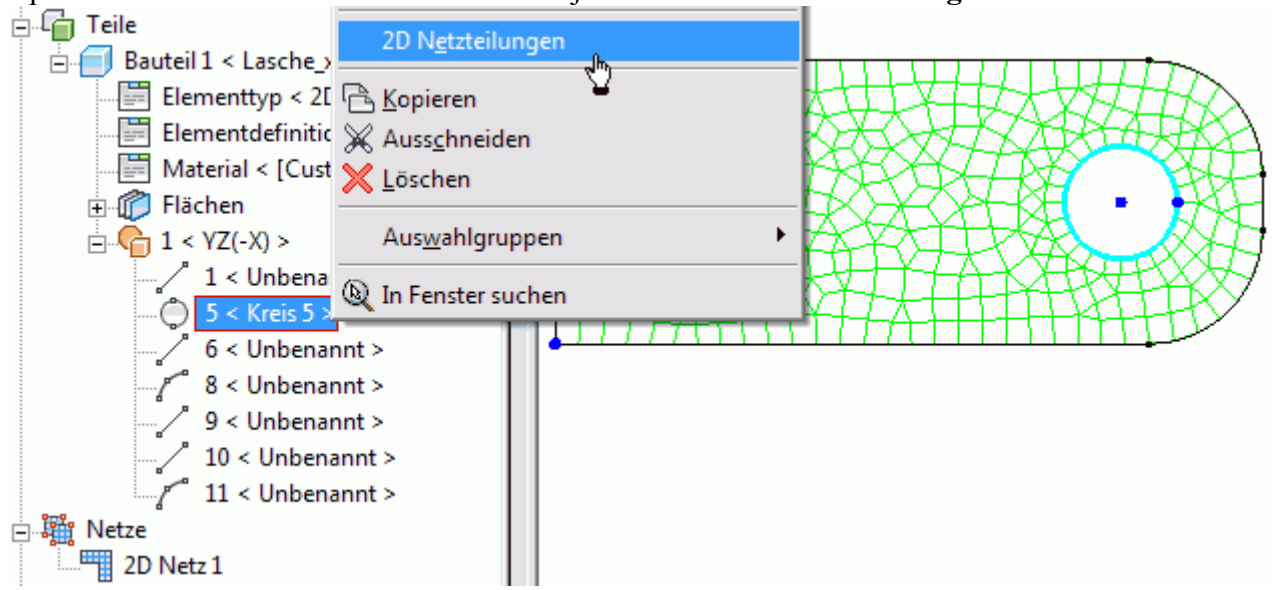


- Nach der Netzgenerierung erscheinen die Kanten des 2D-Netzes (Linien, Bögen, Kreis) als Flächen des Bauteils im Browser. Es handelt sich hier um die einzelnen 3 mmm hohen Seitenflächen des Bauteils.
- Da wir nur ein vernetztes Bauteil in unserem Szenarium bearbeiten, existiert auch nur ein 2D-Netz als Eintrag unter Netze.

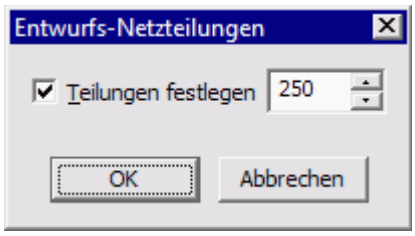
Netzverfeinerung mit Kantenteilungen

Anhand unseren Erfahrungen aus den Simulationen mit dem CAD-basierten Mittelflächen-Netz erscheint die Vernetzung am Lochrand als zu grob und sollte dort verfeinert werden. Im Unterschied zum 3D-Netzgenerator kann man die Netzverfeinerung im 2D-Netzgenerator nicht nur mit Verfeinerungspunkten, sondern auch mit den sogenannten Kantenteilungen steuern:

- Die Steuerung der Vernetzungsdichte über Kantenteilungen ist häufig einfacher, als über Verfeinerungspunkte.
- Im Beispiel aktiviert man für das Konstruktionsobjekt **Kreis** die **2D Netzteilungen**:



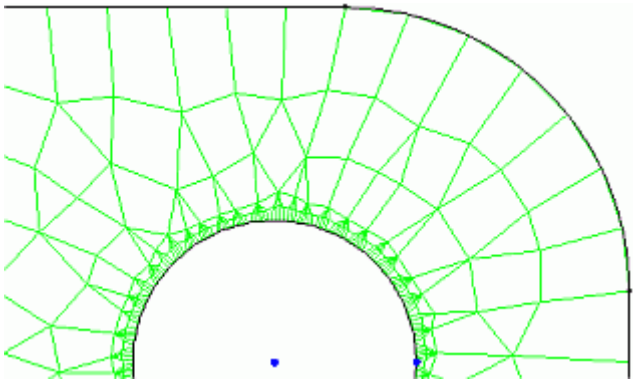
- Die Standardvernetzung mit einem Winkel=15° führte im Beispiel zu 24 Elementen entlang des Kreises. Das entspricht einer Elementgröße von ca. 0,5 mm. Um die Elemente auf ca. 50 µm zu verkleinern, müsste man also eine Teilung von ca. 250 verwenden:



- Zum neuen Netz gelangt man auf zwei verschiedenen Wegen:

  1. **Löschen** des aktuellen 2D-Netzes (unter "Netze"), dann **2D-Netz erstellen** für die Ebene (wie oben) oder
  2. **2D-Netz bearbeiten** für die Ebene (ohne Änderung von Werten) und **Anwenden**

Leider tritt nun ein uns bekannter Effekt auf - der Übergang zwischen feiner und globaler Vernetzung verläuft sehr unstetig:



- **Geom. Verhältnis=1,25** (Einstellung im 2D-Netzgenerator) steuert, wie schnell ein feines Netz zur nicht verfeinerten Dichte übergeht. Leider zeigt dieser Parameter keine Wirkung im Bereich der Kantenteilungen!
- Die Kantenverfeinerung ist anscheinend für unser Beispiel nicht so gut geeignet. Wir werden andere Möglichkeiten ausprobieren, um den Lochrand feiner zu vernetzen.

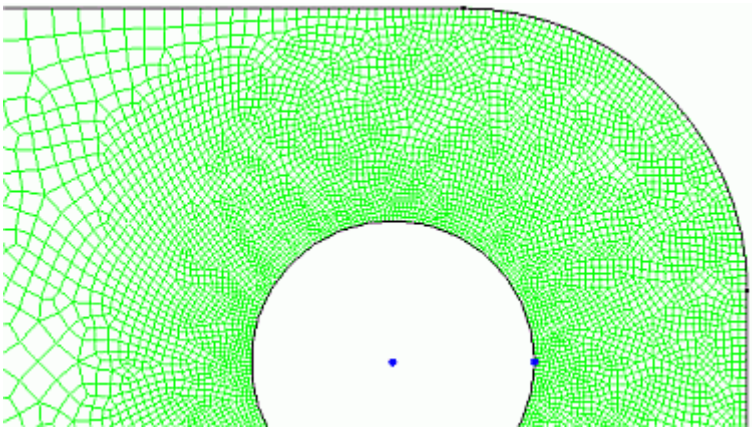
Deaktivieren der Kantenverfeinerung:

- Infolge eines Bugs (oder mangelnden Verständnisses) wird man in der aktuellen Programmversion eine aktivierte Kantenverfeinerung nicht mehr dauerhaft los!
- Entfernt man für die 2D-Netzteilungen des Kreises den Haken vor "Teilungen festlegen", so wirkt dies nur für die nächste Netzgenerierung. Bei weiteren Netzgenerierungen ist der letzte Teilungswert wieder aktiv. Bisher wurde noch kein Weg für die dauerhafte Deaktivierung gefunden.
- ***Wichtig:*** Vor jeder weiteren Netzgenerierung muss man Kantenteilungen wieder Deaktivieren oder man wählt eine Kantenteilung, welche den globalen Einstellungen des 2D-Netzgenerators entspricht.

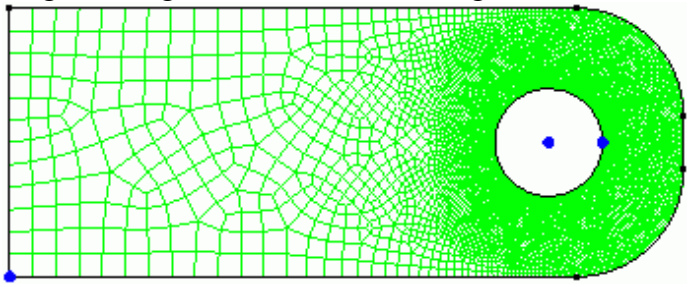
Winkel-Unterteilung an geschwungenen Kanten

Der Parameter **Winkel=15°** des 2D-Netzgenerators bestimmt die Teilung geschwungener Kanten (Kreis, Bogen, Spline), wenn sich dadurch kleinere Elemente als die Standardnetzgröße ergeben. Dies ermöglicht eine höhere Netzdichte in scharfen Kurven, wo wahrscheinlich Spannungskonzentrationen auftreten. Der Bereich innerhalb eines Kreises (oder der Kreis, der dem erweiterten Bogen entspricht) ist mit der gleichen Netzdichte wie der Kreis selbst vernetzt. Ein Übergangsbereich um die Kurve herum lässt das Netz geometrisch von der Kante der Kurve zum standardmäßigen nicht verfeinerten Netz hin wachsen. Das wollen wir nutzen, um das Netz am Lochrand zu verfeinern:

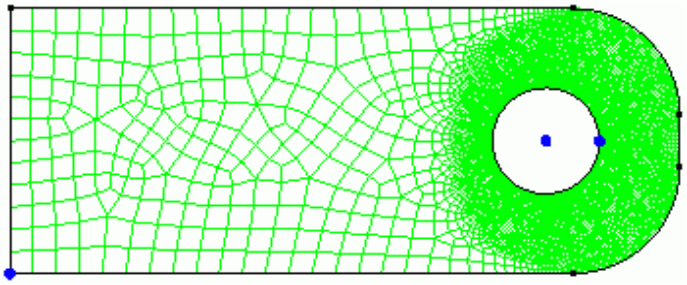
- Der Standardwert **Winkel=15°** führt zu der Teilung=24 der 360° des Lochrandes.
- Verringern wir diesen Wert auf Winkel=1,5°, so ergeben sich 240 Elemente entlang des Lochrandes.
- **Wichtig:** nicht vergessen, vor der Netzgenerierung die Kantenteilung des Kreises zu deaktivieren!
- Da auch die Bereiche innerhalb der Abrundung fein vernetzt werden, erstreckt sich die Verfeinerung über größere Bereiche, als es erforderlich wäre:



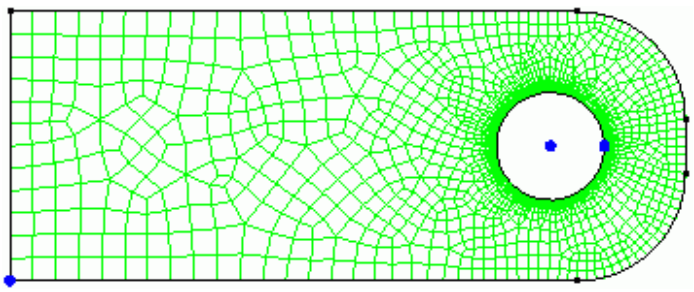
- Der Übergang vom feinen zum globalen groben Netz verläuft insgesamt harmonisch:



- **Geom. Verhältnis** (2D-Netzgenerator) steuert hier den Übergang zwischen feiner und grober Vernetzung (größere Werte bewirken einen schnelleren Übergang / Wert=1 erweitert die Verfeinerung auf das gesamte Netz). Das aktuelle Netz wurde mit **Geom. Verhältnis=1,25** (Standardwert) erzeugt.
- **Geom. Verhältnis=10** vermindert nicht die feine Vernetzung innerhalb der Bögen, sondern realisiert einen schnelleren Übergang zum groben Netz:



- Anscheinend sind **Verfeinerungspunkte** im Zusammenwirken mit dem Parameter **geometrisches Verhältnis** oft die beste Methode, um ein Netz nur in erforderlichen Bereichen hinreichend zu verfeinern.
- Die Definition der Verfeinerungspunkte und die Konfiguration der Ausdehnung und des Übergangs verläuft analog zum 3D-Netzgenerator.
- Da Verfeinerungspunkte somit nichts Neues bieten, werden wir im Rahmen dieser Übung eine Kombination aus Kantenteilung und Winkel-Unterteilung benutzen, um unser Bauteil sinnvoll zu vernetzen:
  - **Teilung=250** aktivieren wir für den Kreis erneut (damit stört uns der Bug nicht mehr!)
  - **Winkel=5°** erzeugt im Bereich der Abrundung eine moderate Elementgröße.
  - **Geom. Verhältnis=1,25** erzeugt einen harmonischen Übergang zur globalen Vernetzung:



←→

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_manuell_-_2D-Netzgenerator&oldid=16332“

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - manuell - Loads and Constraints

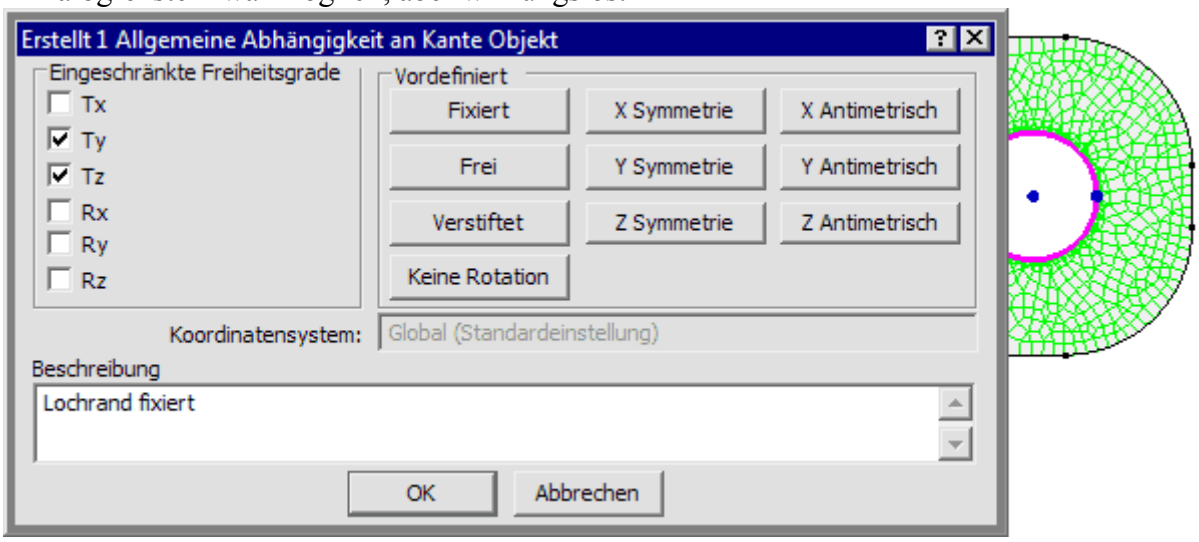
Aus OptiYummy
↑

← →

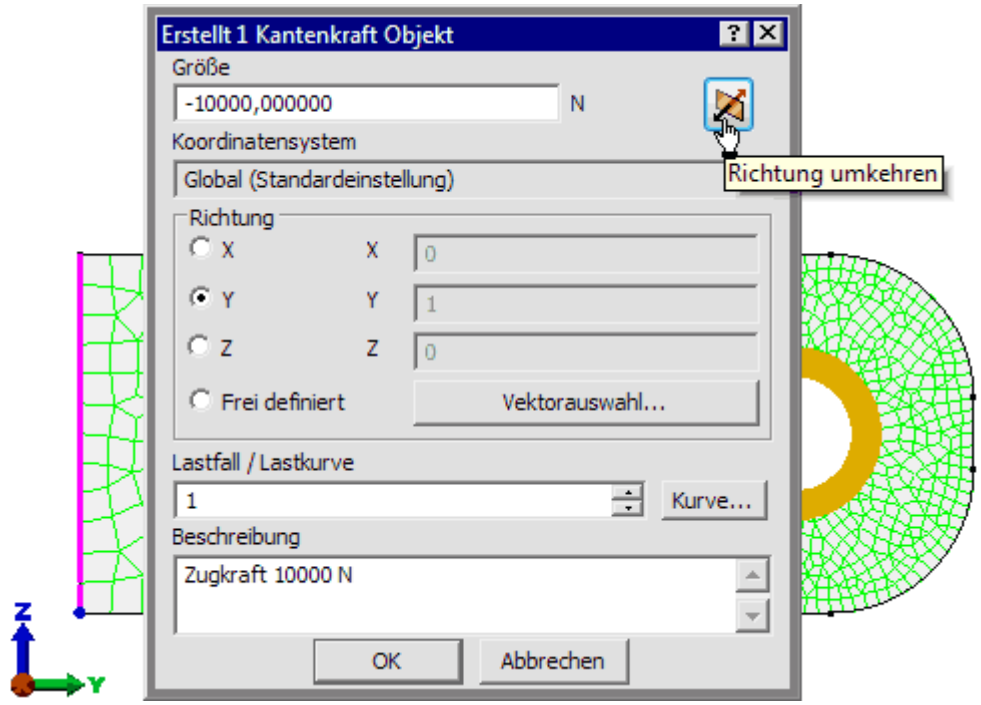
Lasten und Randbedingungen

Für 2D-Netze stehen die gleichen Lasten und Abhängigkeiten zur Verfügung, wie für ein 3D-Netz der Mittelebene des CAD-Modells. In Hinblick auf die Befestigung der Lasche auf einem Bolzen müssen wir uns also auf die Fixierung mittels der **Allgemeinen Abhängigkeit** begnügen:

- Da die Knoten des 2D-Netzes nur die Freiheitsgrade der Translation **Ty** und **Tz** besitzen, müssen am Lochrand nur diese beiden Freiheitsgrade eingeschränkt werden. Die Markierung der anderen Freiheitsgrade ist in dem Dialogfenster zwar möglich, aber wirkungslos:



- **Achtung:** Die Wahl des Lochrandes muss mittels "Kanten-Wahl" erfolgen, damit nur die Knoten des Lochrandes fixiert werden! Standardmäßig ist der Modus "Flächen-Wahl" aktiv. Dies führt jedoch zu einer Fixierung aller Knoten der Rand-Elemente. Diesen Fehler erkennt man daran, dass zwei Reihen von Abhängigkeitssymbolen eingeblendet werden und es dadurch zu einer Verfälschung der berechneten Spannungen kommt.



- Auch die Definition der Kraft-Belastung muss im Modus "Kanten-Wahl" erfolgen, damit die Randknoten der Kante anteilig den richtigen Kraftwert erhalten!

Hinweis:
Von Vorteil ist, dass auch bei einer Neuvernetzung diese auf die Geometrie bezogenen Belastungen und Abhängigkeiten erhalten bleiben. Denn im Unterschied zur Mittelebene des CAD-Modells bleibt die manuell definierte Geometrie bei einer Neuvernetzung erhalten. Die Lasten und Abhängigkeiten werden den Knoten eines neuen Netzes automatisch zugewiesen.

Die simulierten Ergebnisse des 2D-Netzes entsprechen denen aus dem 3D-Netz der Mittenebene:

Es ergeben sich jedoch Unterschiede bei der Berechnung und Darstellung der Ergebnisse:

- Es entfällt die extrem aufwändige Generierung des Flächen-Netzes der Mittelebene aus der Vernetzung der Bauteil-Oberfläche. Das 2D-Netz kann sofort zur Simulation benutzt werden.
- Bei einer Neuvernetzung gehen auf Kanten bezogene Lasten und Abhängigkeiten nicht verloren.
- Die Kanten des Netzes werden in der Ergebnisdarstellung unter Umständen nicht mehr eingeblendet. Das hat auch Einfluss auf die Darstellung des unverformten Zustandes. Es handelt sich hierbei um einen Effekt, der abhängt von der benutzten Grafikkarte.

← →
Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_manuell_-_Loads_and_Constraints&oldid=16342“

-

Software: FEM - Tutorial - 2D-Mechanik - manuell - strukturiertes Netz

Aus OptiYummy
↑

← →

Strukturierte Vernetzung (mit Modell-Symmetrie)

In einem FEM-Programm werden verschiedene Methoden für die Erzeugung von Netzen bereitgestellt. Wir haben bisher nur die sogenannte **freie Vernetzung** (*engl: free mesh*) verwendet.

Free Mesh:

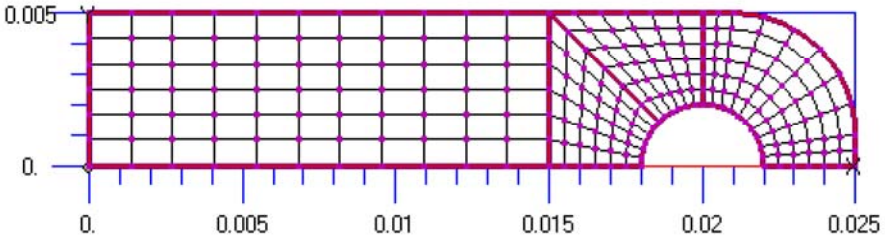
- Innerhalb eines FEM-Programms werden meist unterschiedliche *Free-Mesher* bereitgestellt, die man jeweils umfangreich konfigurieren kann (im *Autodesk Simulation Mechanical* z.B. 3D-Mesher und 2D-Mesher).
- In Hinblick auf Flächennetze kann man mit einem Free-Mesher beliebige Oberflächen automatisch vernetzen. Netzverfeinerungen lassen sich mittels unterschiedlicher Parameter steuern.
- Die erzeugten Netze sind jedoch nicht immer optimal an die Fläche und die Spannungsverläufe angepasst. Das äußert sich z.B. in einer asymmetrischen Element-Anordnung trotz einer achsensymmetrischen Fläche.

Ziel dieses Abschnitts soll ein optimiertes 2D-Netz sein, welches mit möglichst geringem Berechnungsaufwand hinreichend genaue Ergebnisse liefert:

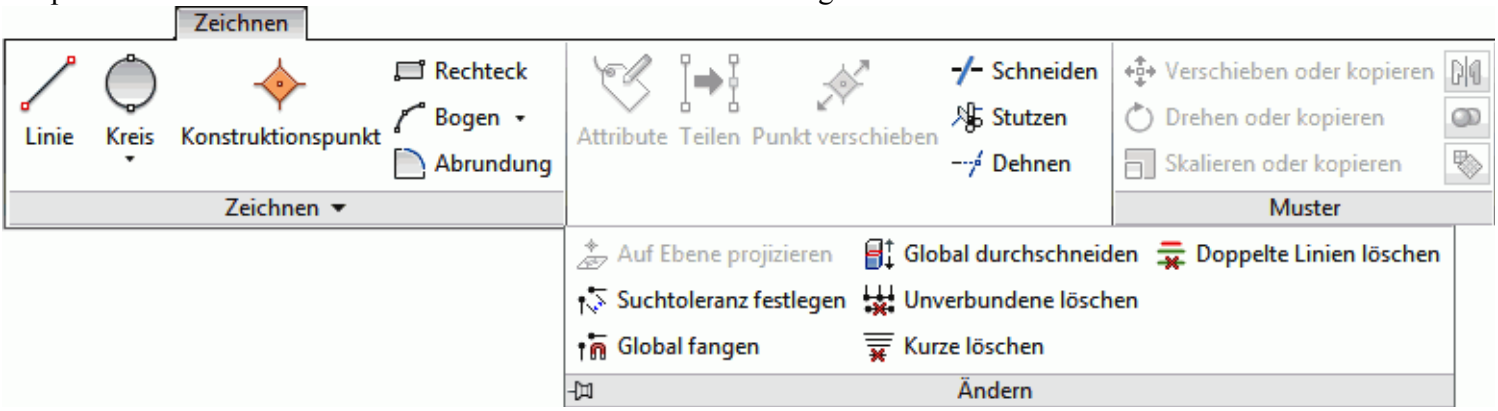
- Da unser Bauteil symmetrisch zur Mittelachse ist und nur in Richtung dieser Mittelachse belastet wird, genügt das Netz einer Symmetriehälfte.
- Wir verwenden die sogenannte **strukturierte Vernetzung** (*engl: mapped mesh*), um ein effizientes 2D-Netz zu erzeugen. Die strukturierte Vernetzung von Flächen wird meist mit Viereck-Elementen durchgeführt.

Mapped Mesh:

Angelehnt an die Kartografie versucht man bei dieser Vernetzungsmethode, Oberflächen mit einem Gitternetz zu überziehen, dessen Rechteck-Raster möglichst wenig verzerrt wird. Das gelingt bei komplexeren Oberflächen nur, wenn man die Gesamtfläche in einfachere 4-seitige Teilflächen zerlegt, welche auch gekrümmte Kanten besitzen können. Das Ziel besteht darin, über alle Teilflächen hinweg fluchtende Reihen- und Spalten von Elementen zu erhalten, z.B.:



Um bereits eingegebene Informationen möglichst weiter zu nutzen, erzeugen wir eine Kopie vom vorhandenen **Free-Mesh**-Szenarium und konfigurieren daraus ein **Mapped-Mesh**-Szenarium. Nach dem **2D-Netz-Löschen** besteht die Hauptarbeit im Ändern der Geometrie mit den Mitteln der FEM-eigenen Zeichen-Funktionen:



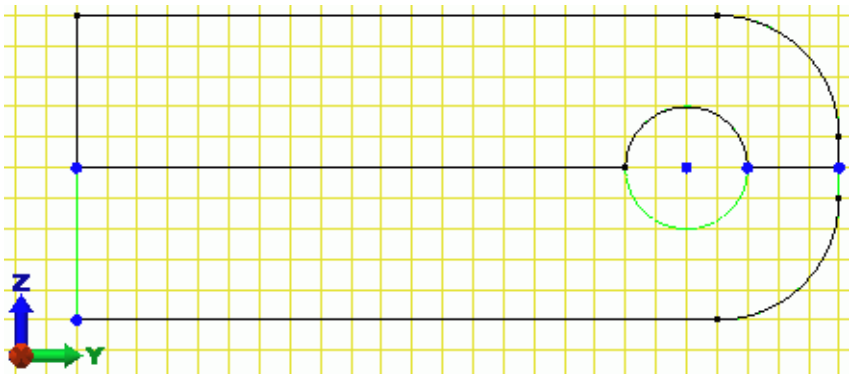
Geometrische Vorbereitung

Hinweise:

Auswahl-Modus "Konstruktionsobjekte" muss vor einer Wahl von Objekten aktiv sein, damit nicht aus Versehen z.B. Rasterpunkte gefangen werden.
"Für Konstruktion verwenden" muss für neue Linien aktiviert sein, damit Konstruktionsobjekte entstehen. Nur solche sind für die strukturierte Vernetzung nutzbar.

- **Geometrie auf Symmetriehälfte "zurechtstutzen"**

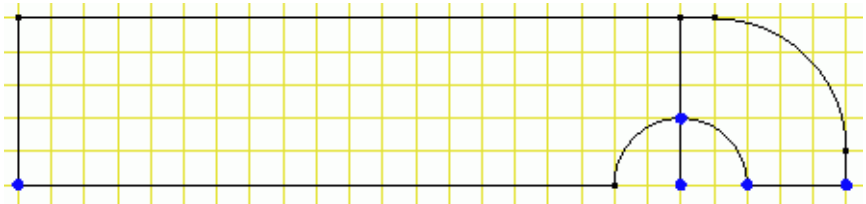
  1. **2D-Netz-Löschen**
  2. **YZ-Ebene als Skizze** aktivieren
  3. Mittels zweier **Konstruktionspunkte** eine **Linie** entlang der Symmetrie-Achse zeichnen
  4. **Stutzen** aller Skizzen-Elemente, welche durch die Symmetrie-Linie geschnitten werden:
     Randelement=Symmetrie-Linie
     zu änderndes Objekt=zu stutzendes Element
     zu trimmendes Segment=zu löschender Elementabschnitt



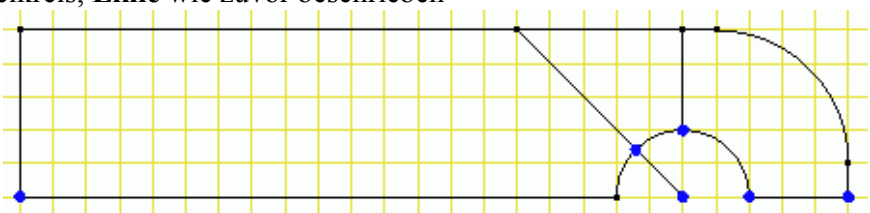
  5. **Löschen** der isolierten Elemente der unteren Symmetriehälfte einschließlich des Konstruktionspunktes (0,0,0). Den Kreismittelpunkt benötigen wir noch für die Konstruktion der Netz-Teilflächen!

- **Zerlegung in 4-seitige Teilflächen**
  Leider existieren viele Funktionen, welche man aus der Skizzier-Umgebung eines CAD-Systems kennt, nicht in den Zeichen-Möglichkeiten eines FEM-Programms. Im Beispiel wird man z.B. Skizzierabhängigkeiten oder Fangen von Mittelpunkten vermissen. Man muss sich jeweils mit den vorhandenen Funktionen irgendwie behelfen:

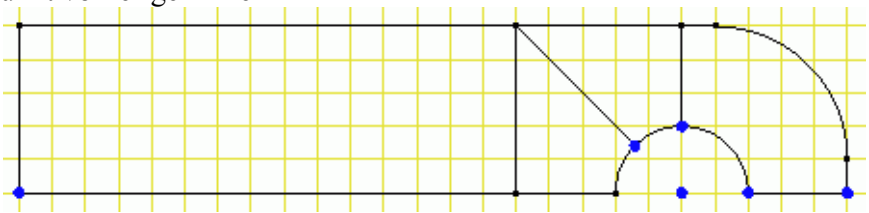
  1. **Teilen** Halbkreis in 2 Abschnitte, **Linie** als Radius im Halbkreis, **Dehnen** der Radius-Linie bis zur oberen Kante, anschließend **Stutzen** des Radius-Abschnitts



  2. **Teilen** linker Viertelkreis, **Linie** wie zuvor beschrieben

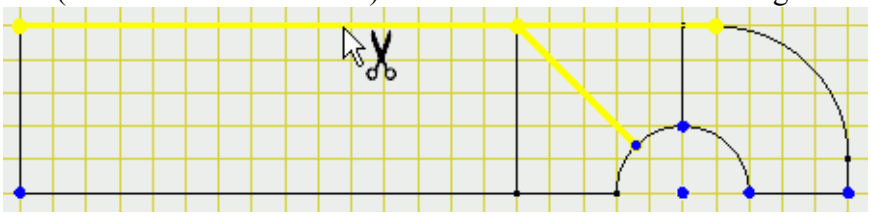


  3. **Rechteck** bis Endpunkt vorherige Linie

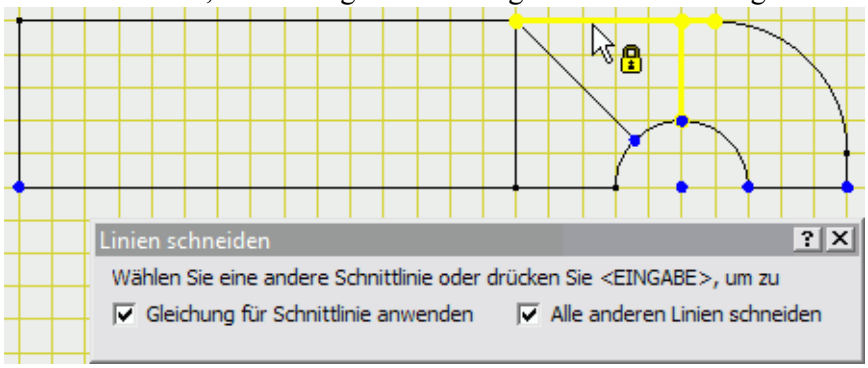


- **Bereinigen der Teilflächen-Geometrie**

1. **Stutzen** von Linien, denn Linien dürfen sich nur zwischen zwei Eckpunkten eines Vierecks erstrecken. Überflüssige Segmente (z.B. unter dem Rechteck) kann man durch Stutzen beseitigen



2. **Schneiden** von Linien in Teilstücke, wenn die getrennten Segmente noch benötigt werden


Linien schneiden
Wählen Sie eine andere Schnittlinie oder drücken Sie <EINGABE>, um zu
Gleichung für Schnittlinie anwenden
Alle anderen Linien schneiden

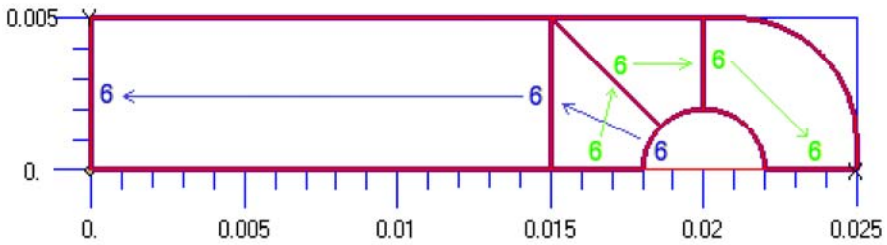
3. **Löschen übereinander liegender Linien** nach Auswahl. Im Beispiel betrifft dies nur die linke Kante des Rechtecks. Die Funktion **Doppelte Linien löschen** ist **hierfür nicht geeignet**, denn sie entfernt diese übereinander liegenden Linien nicht.

Die geometrische Vorbereitung für die strukturierte Vernetzung bot die Gelegenheit, uns vertieft in die Funktionen des 2D-Geometrie-Editors eines FEM-Programms einzuarbeiten. Leider handelt sich bei solchen Editoren meist um individuelle Lösungen, auch wenn das FEM-Programm Bestandteil einer CAD-Suite ist. Das bedingt einen relativ hohen Einarbeitungsaufwand.

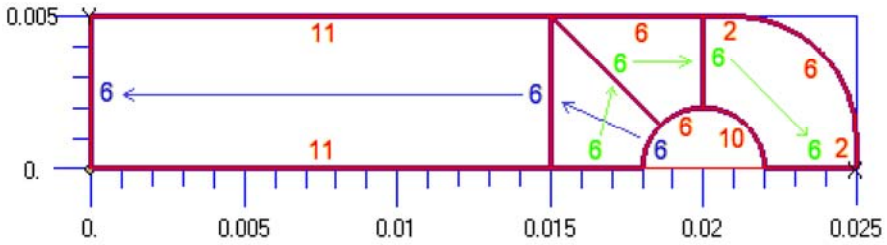
Strukturiertes Vernetzen

Die Zerlegung in geeignete 4-seitige Teilflächen basierte bereits auf qualitativen Vorstellungen, wie das Netz über die gesamte Fläche des Modells gespannt werden soll. Diese qualitativen Vorstellungen müssen nun quantitativ präzisiert werden:

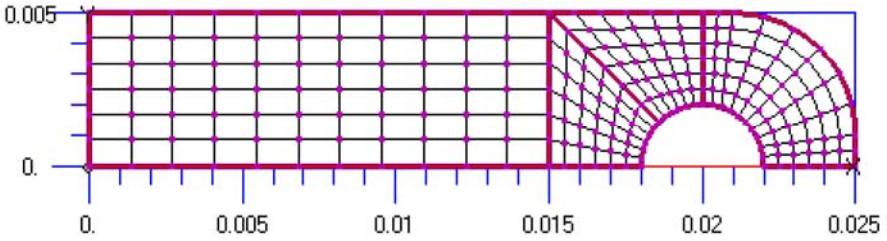
- Innerhalb der 4-seitigen Teilflächen müssen gegenüberliegende Seiten (im Sinne des Netzverlaufs) mit jeweils der gleichen Anzahl von Elementen vernetzt werden.
- Die Planung des Netzes sollte an den kritischen Stellen des FEM-Modells beginnen. Dazu muss man jedoch bereits qualitative Vorstellungen besitzen, wo die größten Gradienten in den berechneten Feldverläufen auftreten. Im Beispiel ist dies am linken Rand des Loches der Fall:
  - Für diesen Rand trifft man die grundlegende Entscheidung, mit wie vielen Elementen er zu vernetzen ist. Zur Demonstration soll das am Beispiel einer ziemlich groben Vernetzung erläutert werden.
  - Entscheidet man sich an der linken Seite des Bolzens für z.B. 6 Elemente auf der anliegenden Kante, so zieht sich diese Feinheit der Vernetzung durch das gesamte Modell (blau):



  - Die Elementzahl auf den anliegenden Kanten dieser Teilfläche kann man unabhängig davon wählen. Dabei sollte man jedoch darauf achten, dass die Elemente des Netzes möglichst rhombenförmig werden. Deshalb fiel die Entscheidung hier auch auf eine Unterteilung in 6 Elemente (grün).
- Im Beispiel wurden die noch nicht spezifizierten Kanten wie folgt in Elemente unterteilt:



- Damit ergäbe sich dann die bereits zu Beginn vorgestellte Vernetzung:



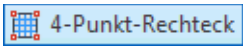
In der Registerkarte ***MFL > Netz*** wird deutlich, dass für die 2D-Geometrie keine Funktionen der 3D-Vernetzung zur Verfügung stehen. Die Funktion **2D-Netz erstellen** ist nur verfügbar, wenn aktuell eine Bauteil-Ebene im Browser des FEM-Editors ausgewählt ist.

Verfügbar ist in der **MFL** die strukturierte Vernetzung einschließlich der Möglichkeiten einer Netzverfeinerung:

Bei unserem strukturierten Netz soll die Lochkante ähnlich fein vernetzt werden, wie zuvor bei der freien Vernetzung mit dem 2D-Netzgenerator:

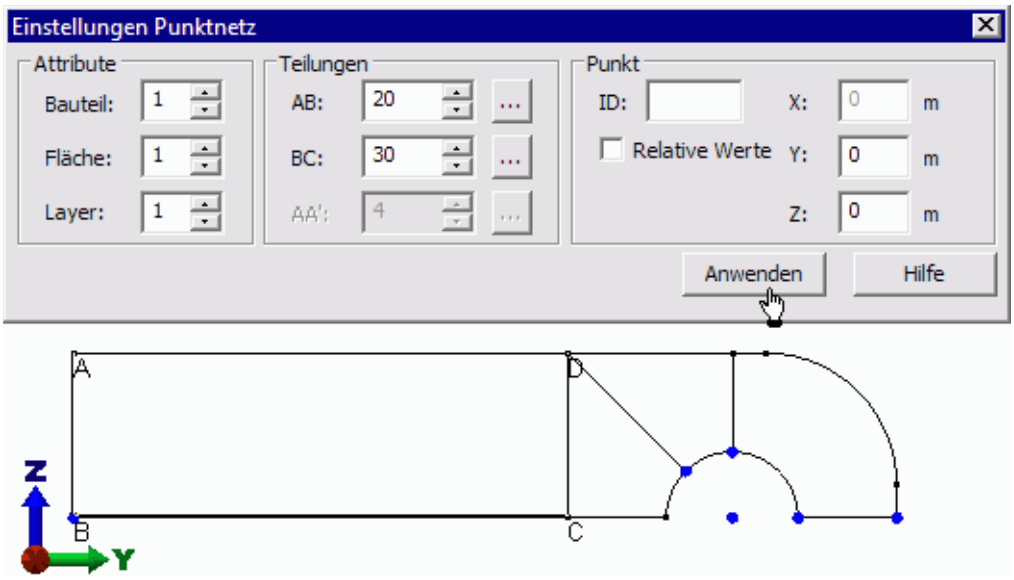
- Die benutzte Teilung=250 für den gesamten Kreisumfang entspricht ungefähr einer Elementzahl von 30 auf dem linken Kreis-Segment des Loches.
- Daraus würde bereits eine ziemlich feine Vernetzung des Rechteck-Abschnittes der Lasche mit 30 Element-Zeilen resultieren.
- Wir planen deshalb nur mit einer Teilung in **20 Elemente** auf dem linken Kreis-Segment.

Wir haben zwar systematisch die einzelnen 4-eckigen Teilflächen des Netzes in der Geometrie nachgebildet. Abhängig von der Vernetzungsfunktion werden wir jedoch nur ein Teil der geometrischen Objekte benötigen (**Auswahlmodus** immer "Konstruktionsobjekte"!).



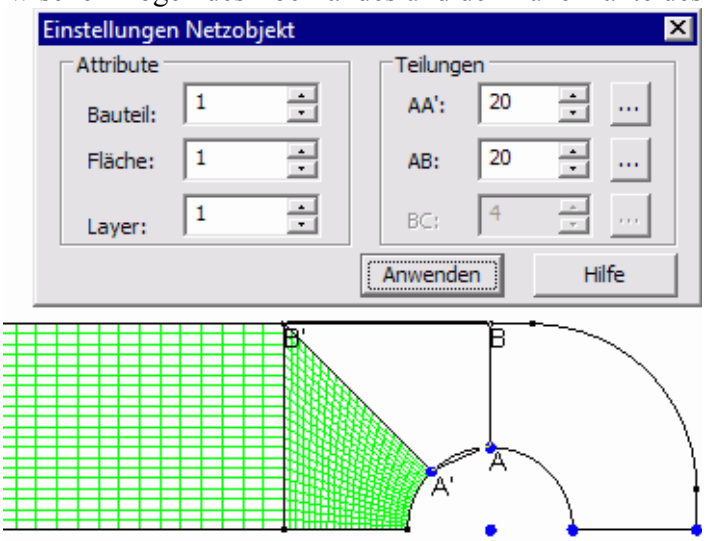
benötigt nur die 4 Eckpunkte der Teilfläche:

- Voraussetzung für die Nutzung dieser Funktion sind gerade Begrenzungslinien der Teilfläche.
- Dies ist nur auf dem geraden Teil der Lasche gegeben. Dieses Rechteck vernetzen wir zuerst.
- Die Wahl der erforderlichen **Punkte A, B, C und D** muss entweder im oder **gegen den Uhrzeigersinn** erfolgen. Man sollte sich die mathematisch positive Richtung "gegen den Uhrzeigersinn" angewöhnen!
- Eine Teilung von 20:60 würde im Beispiel quadratische Elemente bewirken. Da ein Seiten-Verhältnis der Viereck-Elemente von 1:2 akzeptabel ist, genügt eine **Teilung von 20:30**.
- Wir verwenden die standardmäßig eingestellte konstante Teilung entlang der Netzkanten. Prinzipiell kann man dort variable Elementgrößen konfigurieren (Button "..." hinter Teilungswert):

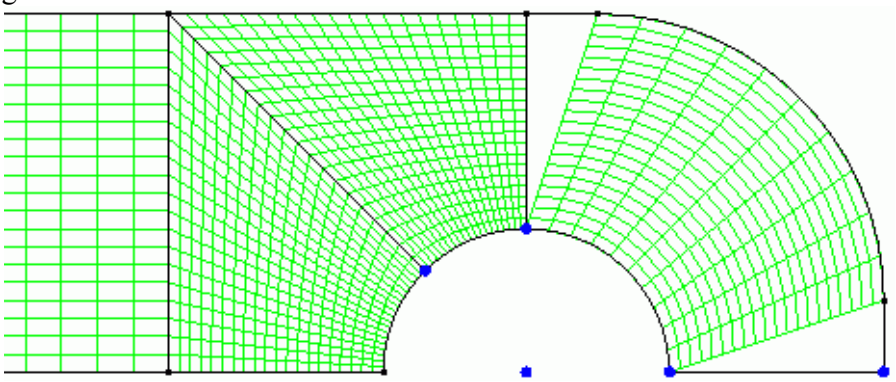


Zwischen 2 Objekten spannt ein 4-eckiges Teilnetz zwischen zwei gegenüberliegenden Konstruktionsobjekten AA' und BB' (Linien, Bögen, Splines):

- Damit können wir Teilnetze zwischen Bögen des Lochrandes und der Außenkante des Bauteils erstellen:



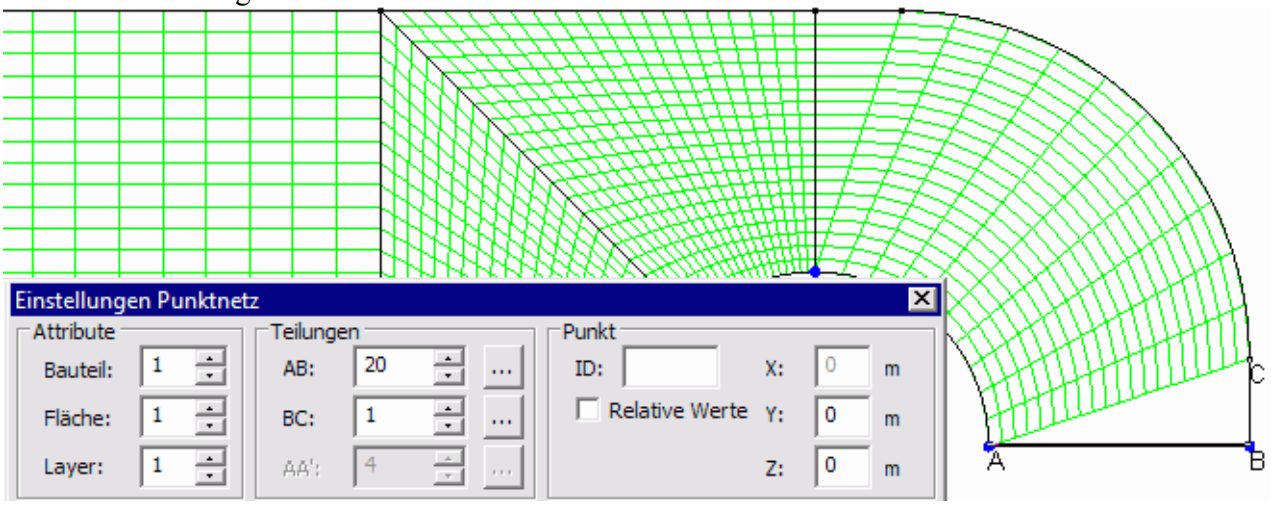
- **Achtung:** Entsteht ein "in sich verdrehtes Teilnetz", so wurde nicht beachtet, dass man die Linienobjekte zur Auswahl "**nahe**" dem Punkt **A** bzw. **B** anklicken sollte!
- Leider gelingt die für die rechte Teilfläche geplante Vernetzung nur teilweise, weil keine Möglichkeit gefunden wurde, den äußeren Bogen mit den zwei angrenzenden Linienstücken zu einem Objekt zusammenzufassen. Wir vernetzen deshalb zuerst das Viereck zwischen den beiden Bögen mit einer gröberen Teilung von 20:10. Es bleiben vorläufig zwei 3-eckige Teilflächen unvernetzt:



- **Hinweis:** Ob eine Teilfläche mit mehreren Objekten zwischen 2 Ecken mit einem strukturierten Teilnetz gefüllt werden kann, ist abhängig von den Möglichkeiten des benutzten FEM-Programms. Das einleitende Demo-Vernetzung mit 6 Elementen an den Lochsegmenten konnte z.B. mit dem Programm FEMAP realisiert werden *(Siehe: **FEMAP-Übung**)*.

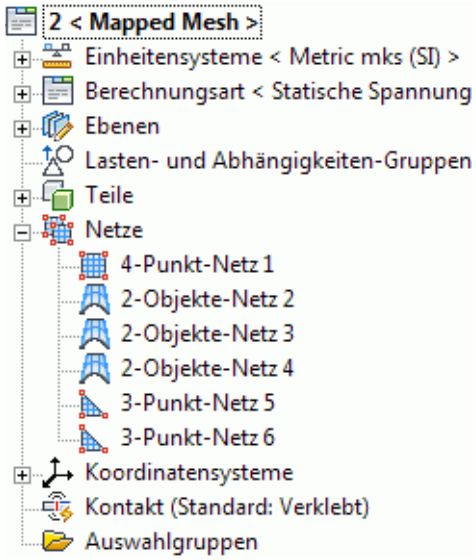
3-Punkt-Dreieck spannt ein Netz zwischen die Punkte A, B und C:

- Die drei Punkte wählen wir wieder entgegen dem Uhrzeigersinn jeweils innerhalb einer der Netzlücken.
- Im Punkt A werden Dreieck-Elemente erstellt. Punkt A sollte deshalb am Lochrand liegen. Das übrige Teilnetz besteht dann aus viereckigen Elementen:



Alle Teilnetze werden im Browser des FEM-Editors als Bestandteil des Szenariums aufgelistet. Man kann sie nachträglich bearbeiten bzw. löschen.

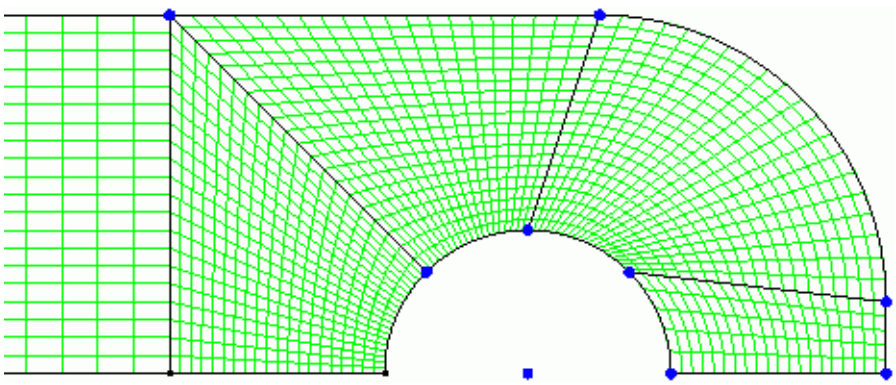
Hinweise zur Aufteilung in Teilflächen:



- Insbesondere die Vernetzung in den 3-eckigen Teilflächen führt zu ungünstigen Element-Proportionen.
- Mit dem jetzigen Wissen, dass man Vierecke mit gekrümmten Seiten nur mit der Funktion Zwischen 2 Objekten vernetzen kann, würde man die Aufteilung in Teilflächen auf der rechten Lochseite etwas anders gestalten.
- Die senkrechte Trennlinie in der Lochmitte müsste nach rechts geneigt werden, um die "senkrechte" Dreieck-Teilfläche einzusparen.
- Die "waagerechte" Dreieck-Teilfläche kann man einsparen, wenn man das rechte Segment der Lochkante ebenfalls teilt und dadurch ein weiteres Viereck gewinnt.

Entsprechend dieser Hinweise ist die rechte Seite des strukturierten Netzes weitestgehend selbstständig umzugestalten:

1. Löschen der zu ändernden Teilnetze
2. Ändern der Geometrie (im Skizzen-Modus der YZ-Ebene, da ansonsten 3D-Objekte entstehen!)
3. Vernetzung der verbesserten 4-eckigen Teilflächen (ähnlich wie im folgenden Bild)



Lasten und Abhängigkeiten

Da wir nur eine Symmetriehälfte der Lasche als FEM-Netz modellieren, muss man die Symmetrie im Beispiel wie folgt beachten:

1. Es darf auf die Modellhälfte nur die Hälfte der realen Lastkraft wirken.

2. Entlang der Symmetrielinie benötigt man zusätzliche Abhängigkeiten, welche eine Bewegung der Randknoten in Z-Richtung verhindern.

Kräfte und Einspannungen müssen in Betrag und Richtung den richtigen Knoten des Netzes zugewiesen werden. Man vermeidet nach Möglichkeit, diese Zuweisung manuell durch Auswahl der betroffenen Knoten vorzunehmen:

- Eine Gesamtkraft müsste auf alle betroffenen Knoten aufgeteilt werden. Bei ungleichmäßiger Vernetzung kann man die notwendigen Einzelkräfte praktisch nicht mehr berechnen.
- Eine Neuvernetzung (z.B. zur Netzverfeinerung) würde die Zuweisung von Kräften und Randbedingungen erneut erforderlich machen.

Wichtig:
Nur durch Zuweisen von Lasten und Abhängigkeiten an Kanten oder Flächen ist automatisch die richtige Belegung der betroffenen Knoten gewährleistet. Dieser Automatismus wirkt dann auch bei einer Neuvernetzung.

Problem:

- Zumindest bis zur aktuellen Version von *Autodesk Simulation Mechanical* kann man an strukturierten Netzen keine Kanten auswählen!
- Das kann man einfach überprüfen, indem man z.B. ein Rechteck einmal mit dem 2D-Free-Mesher vernetzt (Kanten auswählbar) und dann das gleiche Rechteck nach dem Löschen des freien 2D-Netzes mit einem strukturierten Netz überzieht (Kanten nicht auswählbar).
- Wir müssen uns also mit der Zuweisung direkt an die Knoten behelfen. Das hat im Rahmen der Übung den Vorteil, dass man das Prinzip der Kraftaufteilung versteht!

1. Zugkraft von 10000 N

Aufgrund der Symmetrie reduziert sich die erforderliche Gesamtkraft auf 5000 N.

- An der (nicht wählbaren) Kante liegen 20 gleichgroße Elemente mit ihren 21 Knoten.
- Die Kraft von 5000 N darf man nicht gleichmäßig auf diese 21 Knoten verteilen (entspräche á 238,1 N):
  - Die meisten Rand-Knoten des Bauteils sind Eckpunkte zweier Elemente. Die Kraft solcher Knoten verteilt sich je zur Hälfte auf seine zwei Nachbar-Elemente.
  - Die Kraft beider Eck-Knoten des Bauteils wirkt jedoch vollständig auf das zugehörige Eck-Element.
  - Deshalb dürfen Eck-Knoten im Beispiel nur die halbe Kraft erhalten, wie die restlichen Rand-Knoten der Kante. Ansonsten würde an den Eck-Knoten zu stark gezogen!
- Richtig ist bei gleicher Elementgröße folgende Lastverteilung bei **n Elementen** (nicht n Knoten!):
  - Gesamtlast/**n** auf jeden "normalen" Randknoten
  - Gesamtlast/(**2n**) auf jeden Eck-Knoten
- ***Hinweis:***
  Man kann einen Knoten nicht auswählen, wenn an gleicher Stelle ein Konstruktionspunkt existiert. Deshalb muss man vor der Kraft-Zuweisung z.B. den Konstruktionspunkt in der unteren linken Ecke löschen!

2. Fixierung des Lochrandes

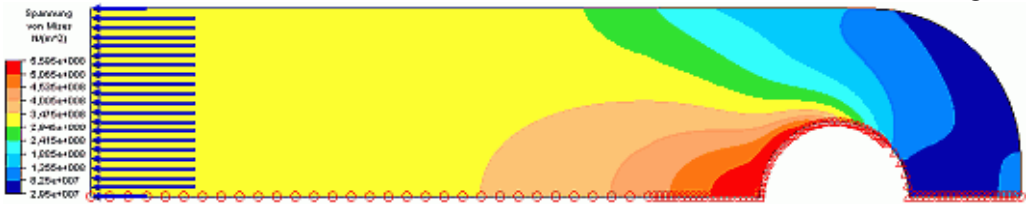
- Auch hier das Problem, dass Knoten unter Konstruktionspunkten nicht wählbar sind. Man muss alle Konstruktionspunkte des Lochrandes löschen!
- Es genügt die Fixierung aller Randknoten durch Einschränkung der Freiheitsgrade **Ty** und **Tz**.

3. Symmetrie-Bedingungen

- Konstruktionspunkte beachten!
- Die Knoten auf der Symmetrie-Achse dürfen sich nicht in Z-Richtung bewegen (**Tz** einschränken)
- Die beiden Knoten des Lochrandes, welche auf der Symmetrie-Achse liegen, besitzen bereits die Einschränkung **Tz**. Wird beiden Knoten erneut eine Abhängigkeit zugewiesen, so erfolgt eine Kombination aller vorhandenen Einschränkungen. Dies stört hier nicht, man könnte die beiden Knoten aber auch beim Zuweisen der Symmetrie-Bedingung aussparen.
- Bei der Auswahl der Knoten entlang der Symmetrie-Achse werden diejenigen Knoten hervorgehoben, welche bereits eine Last bzw. eine Abhängigkeit besitzen. Dies dient nur zur Information und hat keine Auswirkung auf die Zuweisung der neuen Abhängigkeit.

Ergebnisse bei fixiertem Lochrand

Die simulierten Ergebnisse des strukturierten 2D-Netzes entsprechen denen aus dem freien 2D-Netz. Die wenige Prozent Abweichung beim berechneten Maximalwert resultieren aus der unterschiedlich feinen Vernetzung des Lochrandes:



Verschweisst auf Bolzen

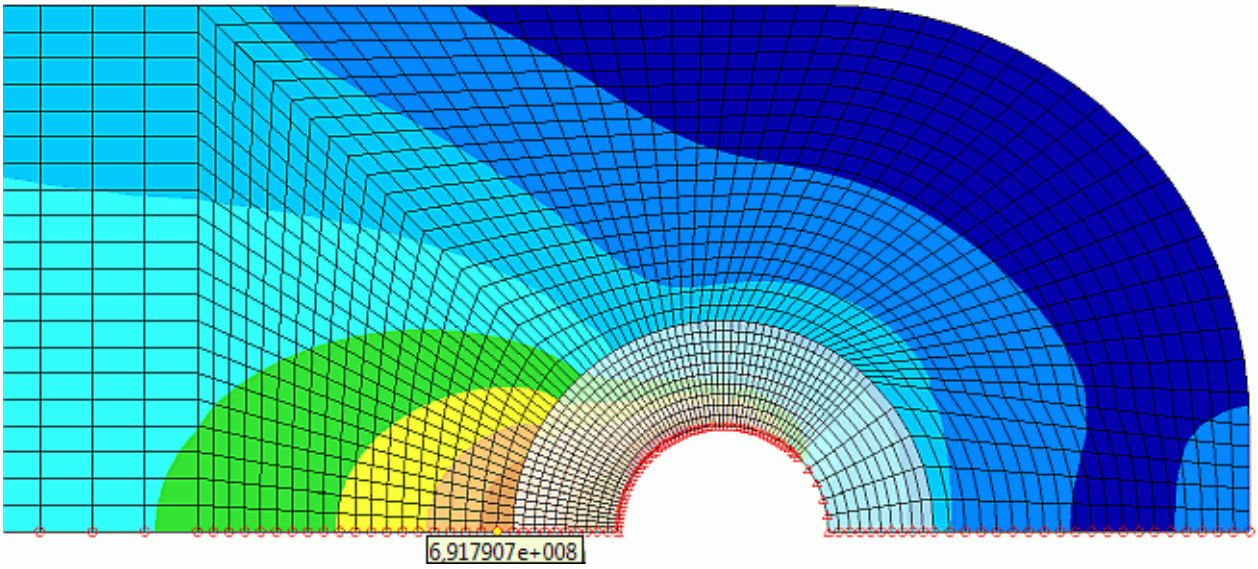
Wird der Lochrand der Lasche mit einem Bolzen verschweißt, so ist der Lochrand nicht ideal fixiert, wie wir es vereinfachend angenommen haben:

- Infolge der Belastung verformt sich in der Realität der Bolzen.
- Infolge der Verformung des Bolzens entfallen die Spannungsspitzen am Rand des Loches.

Mit dem bisher erworbenem Wissen und einigen Hinweisen sollte es kein Problem darstellen, einen Titan-Bolzen als zweites Bauteil zu definieren und als strukturiertes Netz zu modellieren:

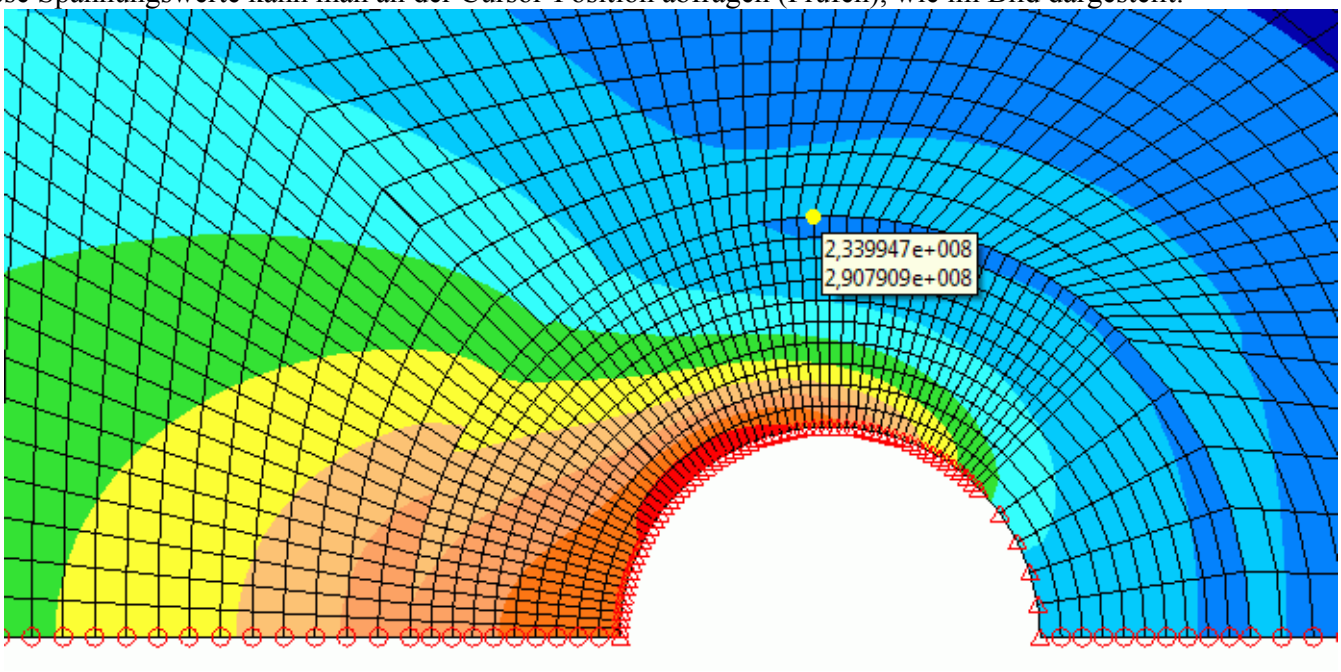
- Wir benutzen für die Modellerweiterung das vorhandene "Mapped Mesh Szenario" des fixierten Lochrandes.
- Die Belastung des Titan-Bolzens soll uns im Beispiel nicht interessieren. Auf ein "Voll-Material" können wir verzichten, es genügt für den Bolzen ein Materialring der Wandstärke **1 mm** ebenfalls mit der Element-Dicke=**3 mm**. Die Bohrung des Titan-Ringes fixieren wir, um die Bolzenbefestigung nachzubilden.
- In *Autodesk Simulation Mechanical* gilt:
  1 Bauteil = 1 Elementkonfiguration = 1 Material.
- Geometrie mit einem zusätzlichen Material (z.B. den Titan-Bolzen) muss man als weiteres, neues Bauteil definieren (**Bolzen-Material: *Other* > *Metal* > *Titanium.Ti***)
- Beim Skizzieren der neuen Geometrie muss man darauf achten, dass diese dem Bolzen-Bauteil zugeordnet wird.
- Als Bolzengeometrie genügt für die strukturierte Vernetzung ein Halbkreis (als Nachbildung des Bolzen-Loches), den wir in vier Segmente teilen (für vier strukturierte Teilnetze zum Lochrand der Lasche). Die beiden Linien entlang der Symmetrielinie werden für den Bolzen nicht benötigt.
- ***Wichtig:*** Für die Bolzen-Teilnetze muss man die vorhandene Loch-Geometrie der Lasche benutzen. Zeichnet und verwendet man im neuen Bauteil zusätzliche Segmente für den Außenrand des Bolzens, so entsteht ein Bolzennetz, welches nicht mit dem Netz der Lasche verbunden ist!

Aktiviert man nach der Simulation für die Ergebnisse ***Bolzen-Bauteil > Durchsichtig zeichnen***, damit man den Lochrand der Lasche besser erkennt, so ergibt sich der folgende Mises-Spannungsverlauf in der Lasche:

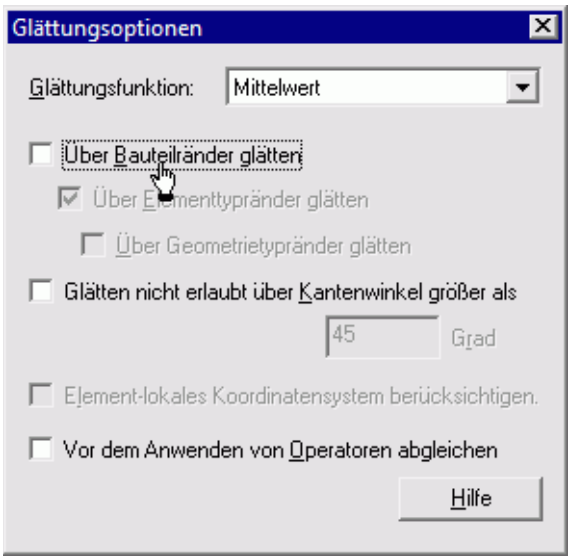


Die Ergebnisse an der Materialgrenze zwischen Stahl und Titan wollen wir etwas genauer betrachten:

- Die Sprünge im Spannungsverlauf resultieren überwiegend aus den unterschiedlichen E-Modulen der beiden Materialien (Faktor 1,74).
- Die Knoten der Grenzschicht gehören gleichzeitig zu Elementen mit unterschiedlichen Eigenschaften.
- Die Knoten einer Grenzschicht besitzen zwar eine eindeutige Position, aber es lässt sich ihnen keine eindeutige Spannung zuordnen (Spannungssprung im Knoten!).
- Im benutzten FEM-Programm werden alle Spannungswerte eines Knoten an den Post-Prozess (Ergebnisauswertung) übergeben. Im Beispiel sind es zwei Spannungen, weil diese Randknoten jeweils an zwei unterschiedliche Elemente grenzen.
- Diese Spannungswerte kann man an der Cursor-Position abfragen (Prüfen), wie im Bild dargestellt:



- Der berechnete Spannungsverlauf innerhalb der Randelemente ist abhängig von der gewählten Glättungsoption für die Farbkontur.
- **"Über Bauteilränder glätten"** darf **nicht aktiviert** sein (standardmäßig gewährleistet), damit der real vorhandene Spannungssprung abgebildet wird.



Frage 3:

- Wie groß darf die maximale Zugkraft bei verschweißtem Lochrand auf nachgiebigem Titan-Bolzen sein, damit ein Sicherheitsfaktor von 2 innerhalb der Lasche nicht unterschritten wird?
- Die Lösungsdatei ist konfiguriert mit dieser zulässigen Kraft einzusenden.

Frage 4:

- Welchen Wert sollte man als maximal zulässige Kraft für die Einhaltung eines Sicherheitsfaktors von 2 benutzen, wenn die Art der Befestigung der Lasche auf dem Bolzen beliebig sein kann?
- Diese Entscheidung ist nachvollziehbar zu begründen!

← →

Von „http://optiyummy.de/index.php?title=Software:_FEM_-_Tutorial_-_2D-Mechanik_-_manuell_-_strukturiertes_Netz&oldid=16377“

-